

Научная статья

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

УДК 669.716:621.745

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2024.02.012

ТЕПЛОВОЕ РАСШИРЕНИЕ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ ПОСЛЕ ОБРАБОТКИ РАСПЛАВА И ТЕРМООБРАБОТКИ

Марина Владимировна Попова¹, Марина Александровна Малюх^{2†}

^{1,2} Сибирский государственный индустриальный университет, ул. Кирова, 42, 654007, Новокузнецк, Россия

¹ m.popova@rdtc.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8010-9134>

² starostina_ma1976@mail.ru[†], <https://orcid.org/0000-0003-2299-9292>

Аннотация. Настоящая работа освещает результаты исследований, проведенных с целью определения влияния различных реагентов, используемых при обработке расплава, на температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) двойных сплавов системы Al–(11÷40)%Si специального назначения. Установлено, что использование в качестве реагента для обработки расплава водного раствора сульфата меди CuSO₄ и в качестве модификатора расплава смеси карбонатов щелочноземельных металлов (CaCO₃·MgCO₃) позволяет снизить значения ТКЛР всех исследуемых сплавов в рабочем интервале температур. Было показано, что использование паров карбамида для обработки расплава приводит к снижению ТКЛР доэвтектических сплавов во всем температурном интервале испытаний. Установлено, что термическая обработка, заключающаяся в нагреве от 100 до 200 °С в течение 10 часов с последующим охлаждением на воздухе, способствует дальнейшему снижению значений ТКЛР исследуемых сплавов. Было отмечено повышение физико-механических характеристик сплавов Al–Si после модифицирования, что можно объяснить улучшением усвоения водорода и кислорода, вводимых в расплав. Сделано предположение, что частицы тугоплавких оксидов Ca и Mg, содержащихся в смеси, обеспечивают дополнительные многочисленные центры кристаллизации. В результате сделан вывод о том, что экологически безопасная технология модифицирования расплава смесью карбонатов щелочноземельных металлов позволяет снизить температуру перегрева расплава с 1100–1200 °С до 900 °С и сократить продолжительность процесса выплавки с 5–6 до 1–1,5 часов.

Ключевые слова: алюминий, кремний, температурный коэффициент линейного расширения, обработка расплава.

Для цитирования: Попова М.В., Малюх М.А. Тепловое расширение алюминиевых сплавов специального назначения после обработки расплава и термообработки // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2024. Т. 21, № 2. С. 239–246. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2024.02.012.

Original article

THERMAL EXPANSION SPECIAL PURPOSE ALUMINUM ALLOYS AFTER MELT TREATMENT AND HEAT TREATMENT

Marina V. Popova¹, Marina A. Malyukh^{2†}

^{1,2} Siberian State Industrial University, Kirov Str., 42, Novokuznetsk, 654007, Russia

¹ m.popova@rdtc.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8010-9134>

² starostina_ma1976@mail.ru[†], <https://orcid.org/0000-0003-2299-9292>

Abstract. This paper highlights the results of studies carried out to determine the effect of various reagents used in melt processing on the temperature coefficient of linear expansion (TCLE) of binary alloys of the Al–(11÷40)%Si system for special purposes. It has been established that the use of an aqueous solution of copper sulfate CuSO₄ as a melt treatment agent and a mixture of alkaline earth metal carbonates (CaCO₃·MgCO₃) as a melt modifier makes it possible to reduce the thermal expansion coefficients of all the alloys under study in the working temperature range. It was shown that the use of urea vapor for melt treatment leads to a decrease in the thermal expansion coefficient of

hypoeutectic alloys over the entire temperature range of tests. It has been established that heat treatment, which consists in heating from 100 to 200 °C for 10 hours, followed by cooling in air, contributes to a further decrease in the values of the thermal expansion coefficient of the alloys under study. An increase in the physical and mechanical characteristics of Al–Si alloys after modification was noted, which can be explained by an improvement in the assimilation of hydrogen and oxygen introduced into the melt. It has been suggested that particles of refractory Ca and Mg oxides contained in the mixture provide additional numerous crystallization centers. As a result, it was concluded that an environmentally safe technology for modifying the melt with a mixture of alkaline earth metal carbonates makes it possible to reduce the overheating temperature of the melt from 1100–1200 °C to 900 °C and reduce the duration of the smelting process from 5–6 to 1–1.5 hours.

Keywords: aluminum, silicon, temperature coefficient of linear expansion, melt treatment.

For citation: Popova, M. V. & Malyukh, M. A. (2024). Thermal expansion special purpose aluminum alloys after melt treatment and heat treatment. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 21(2), 239–246. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2024.02.012.

Введение

Сплавы специального назначения должны соответствовать требованиям к конкретному комплексу механических, физических, физико-химических и технологических свойств, необходимых для эксплуатации изделий в строго определенных условиях. В качестве примера могут быть рассмотрены приборы и аппараты аэрокосмической промышленности, которые эксплуатируются при низких или повышенных температурах. Для приборов космической отрасли важно сочетание следующих характеристик: высокой коррозионной стойкости, малого удельного веса и размерной стабильности в широком интервале температур. Чтобы обеспечить последнее требование необходимо иметь минимальные значения температурного коэффициента линейного расширения и исключить фазовые превращения в интервале температур эксплуатации приборной техники. При разработке новых легких материалов для аэрокосмической промышленности особое внимание уделяется сплавам на основе алюминия, в частности, силуминам заэвтектического состава [1, 2]. Известно, что изменяя соотношение примесных элементов, при воздействии на расплав с помощью различных физических, механических и химических способов, возможно получать металлические сплавы с требуемыми значениями ТКЛР [3, 4].

Множество современных научно-исследовательских работ посвящены изучению влияния легирования на структуру и механические свойства алюминиевых сплавов [5–10]. Так, например, авторы [5] установили, что сплавы системы Al–Mg–Si (алюминиевые сплавы серии бxxx) характеризуются хорошими прочностными свойствами и коррозионной

стойкостью, улучшенной свариваемостью, а также снижением остаточных напряжений в крупногабаритных пластинах и листовых изделиях. Такое сочетание свойств придает им привлекательность для применения в авиационной промышленности. В работах [6–8] показано, что легирование сплавов Al–Si медью и магнием способствует их упрочнению при термической обработке за счет образования интерметаллидных фаз, что значительно повышает механические свойства силуминов.

Однако в научной литературе встречается гораздо меньше сведений о влиянии легирующих элементов на тепловое расширение алюминиевых сплавов [11].

Структура заэвтектических сплавов системы Al–Si, формируемая обычными методами литья, характеризуется наличием грубой эвтектики и крупными кристаллами кремнистой фазы. Разрабатывая новые материалы с необходимым комплексом технологических и физико-механических свойств необходимо измельчить первичные кристаллы кремния и эвтектику. С этой целью сплавы модифицируют, рафинируют или подвергают прогрессивным методам термообработки. Существуют различные способы модифицирования силуминов, предполагающие использование натрийсодержащих смесей, введение модификаторов в виде солей и лигатур, фосфорсодержащих соединений, кислородсодержащих реагентов, добавок и присадок на основе высокодисперсных компонентов [12, 13]. Важно отметить, что перечисленные технологии имеют существенный недостаток – наличие вредных фторидных и хлоридных выделений в атмосферу. Известно, что использование комбинированных модифицирующих средств, состоящих из 2-х и более элементов, значительно эффективнее каждого

элемента в отдельности. Имеется большое количество научных публикаций, подтверждающих активное участие водорода в формировании структуры и технологических свойств алюминиевых сплавов, получаемых различными способами [14-18]. Введение водорода в сплавы Al-Si позволяет обеспечить комплексное модифицирующее воздействие на структуру заэвтектических силуминов [19, 20].

Авторами разработан способ обработки расплава заэвтектических силуминов смесью карбонатов щелочноземельных металлов [21]. Этот способ модифицирования значительно улучшает структуру и технологические свойства сплавов, но подробных систематических исследований по влиянию этого способа на значения ТКЛР не проводилось. В связи с этим целью настоящей работы являлось исследование возможности получения мало изменяющихся значений ТКЛР заэвтектических силуминов в рабочем интервале температур за счет обработки расплава смесью карбонатов кальция и магния, обеспечивающей повышенное содержание элементов внедрения (H, N, O) в расплаве и образование устойчивых H-N-комплексов, являющихся готовыми центрами кристаллизации [20].

Сплавы специального назначения должны обладать стабильными эксплуатационными свойствами, т.к. необходимо исключить влияние внешней среды (изменение температуры, давления и др.). Поэтому дополнительно изучали влияние термической обработки на ТКЛР исследуемых сплавов.

Материал и методики исследования

Двойные сплавы Al-(11÷40)%Si использовали в качестве материала исследования. Выплавка осуществлялась следующим образом: в расплавленный алюминий вводили кремний в количестве 11, 20, 30, 40 %, затем расплав обрабатывали смесью карбонатов кальция и магния, взятых в равном соотношении (в количестве 1-7 % от массы расплава). Обработка расплава проводилась при температуре 710-910 °С в течение 3-15 минут. Дополнительно в течение 5-15 минут при 800-1100 °С расплав продували парами водного раствора сульфата меди CuSO_4 в количестве 0,1-0,2 % от массы расплава. С целью сравнения проводили продувку расплава парами карбамида $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ в течение 3...6 мин при температурах 700...900 °С. Спла-

вы заливали в алюминиевый кокиль с температуры 750-730 °С.

Дилатометрические исследования проводились на дифференциальном оптическом фоторегистрирующем дилатометре системы Шевенара (погрешность прибора составляла $\pm 0,1 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹).

Исследуемые сплавы Al- (11÷40)%Si подвергали термической обработке, которая заключалась в нагреве в течение 10 ч при температурах 100, 150 и 200 °С с последующим охлаждением на воздухе. Температура обработки обусловлена интервалами наиболее активного диффузионного перераспределения водорода в металле и его взаимодействия с азотом, как собственным, так и поступившим в процессе обработки расплава [4].

Результаты исследования и их обсуждение

В низкотемпературном интервале испытаний выявлено снижение ТКЛР сплавов Al-(20÷40)%Si, которые предварительно в процессе выплавки обрабатывали водным раствором сульфата меди (табл.1). Таким образом, средние значения ТКЛР сплава Al-20%Si обычного приготовления в рабочем интервале температур составляют $18 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹, тогда как сплав, обработанный сульфатом меди, имеет значения $16,6 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹. Для сплава Al-30%Si наблюдается незначительное снижение ТКЛР. Самые низкие значения ТКЛР в интервале температур эксплуатации приборной техники наблюдаются у сплава Al-40% Si. В данном случае средние значения ТКЛР после обработки расплава составляют $11,3 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹, тогда как значения сплава обычного приготовления равны $13,7 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹.

Наблюдаемое снижение предположительно связано с увеличением содержания меди в составе сплавов, наряду с протеканием процессов старения при охлаждении с температур кристаллизации (в интервале 200-300 °С).

При рассмотрении высокотемпературного интервала испытаний наблюдается повышение значений ТКЛР за счет обработки расплава, однако при таких температурах приборы не эксплуатируют, поэтому данное обстоятельство не является определяющим. При меньшем времени продувки расплава ТКЛР снижается незначительно, при большем наблюдается резкое увеличение количество шлака, что приводит к уменьшению выхода годного металла, поэтому выбранный режим продувки можно считать оптимальным.

Таблица 1. Влияние обработки расплава парами водного раствора CuSO_4 на линейное расширение сплавов Al–Si

Table 1. Effect of treatment of the melt with vapors of an aqueous solution of CuSO_4 on linear expansion of Al–Si alloys

Сплав	$\alpha \cdot 10^6 \text{ град}^{-1}$, при температурах испытания, °С								
	50	100	150	200	250	300	350	400	450
Al–20%Si									
без обработки расплава	17,4	18,2	18,7	19,2	20,0	19,2	17,2	17,4	17,3
с обработкой расплава	15,8	16,7	17,3	18,2	19,9	19,9	20,4	20,0	16,9
Al–30%Si									
без обработки расплава	15,2	16,1	16,5	17,3	18,9	17,6	17,4	16,5	16,7
с обработкой расплава	14,2	15,2	16,0	16,7	17,2	17,8	20,8	18,0	16,0
Al–40%Si									
без обработки расплава	13,5	13,8	13,9	13,1	12,4	11,8	11,1	12,1	12,8
с обработкой расплава	11,2	11,3	11,4	11,5	11,2	12,1	11,9	11,3	13,1

Исследования изменения теплового расширения сплавов Al–(11÷40)%Si, подвергнутых обработке карбамидом ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$) показали, что выбранный способ приготовления способствует существенному снижению значений ТКЛР сплавов Al–11% Si в интервале температур 50÷450 °С (рис.1). В рабочем интервале температур наблюдается наибольшее снижение со значений $19,0 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$ до $15,7 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$. Выявлено аномальное повышение значений ТКЛР высококремнистых силуминов с содержанием кремния 20, 30 и 40 % при $t_{\text{исп}} = 300 \text{ °С}$. Данная аномалия линейного расширения является характерной для настоящей группы сплавов и обуславливается разложением кремни-

стой фазы и выходом элементов внедрения в металл-основу.

При рассмотрении рабочих температур эксплуатации приборной техники, наблюдается равномерное понижение значений ТКЛР всех сплавов, подвергнутых обработке. Известно, что легирование кремнием в количестве до 12 % не дает требуемое снижение значений ТКЛР. Введение кремния в количествах превышающих пределы эвтектического состава приводит к снижению прочностных характеристик, соответственно к охрупчиванию сплава. Таким образом, теряется технологическая и эксплуатационная пригодность высоколегированных сплавов. Одним из резервов снижения хрупкости является термическая обработка.

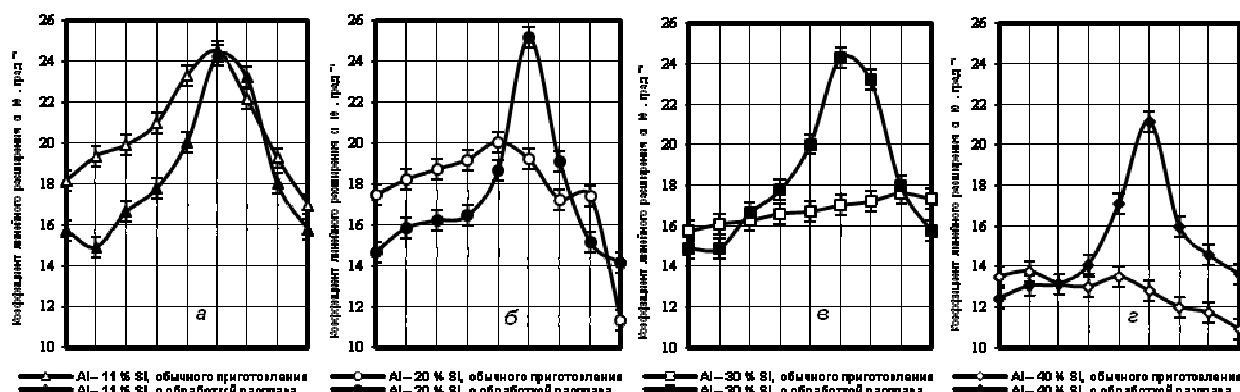


Рис.1. Влияние обработки расплава парами $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ на линейное расширение сплавов Al–Si: а) Al–11%Si, б) Al–20%Si, в) Al–30%Si, г) Al–40%Si

Fig.1. Effect of melt treatment with $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ vapors on linear expansion of Al–Si alloys: а) Al–11%Si, б) Al–20%Si, в) Al–30%Si, д) Al–40%Si

На рисунке 2 представлены результаты исследований влияния термообработки, заключающейся в нагреве от 100 до 200 °С в течение 10 ч и охлаждении на воздухе, на ТКЛР исследуемых сплавов.

Наблюдается снижение ТКЛР малокремнистых силуминов в интервале температур испытания 300...450 °С после нагрева при любой из выбранных температур. Установ-

лено, что наиболее эффективным является режим нагрева при 150 °С. Следует отметить, что повторная термообработка при тех же параметрах не способствует дальнейшему снижению ТКЛР сплава Al-11%Si. При рассмотрении высококремнистых силуминов наблюдается уменьшение аномалии линейного расширения, которая проявляется при $t_{исп}$ 300 °С. Чем выше температура нагрева, тем эффективнее снижается ТКЛР сплавов Al-(20÷40)%Si.

Важно отметить, что нагрев при 200 °С приводит к устранению данной аномалии. Вероятно, при данной температуре элементы внедрения образуют собственные соединения с низким ТКЛР, что способствует устранению аномалии. Выбранное время обработки достаточно для полного прохождения диффузионных процессов, т.к. увеличение времени нагрева при 200 °С до 20 ч не привело к дополнительному снижению ТКЛР изучаемых сплавов.

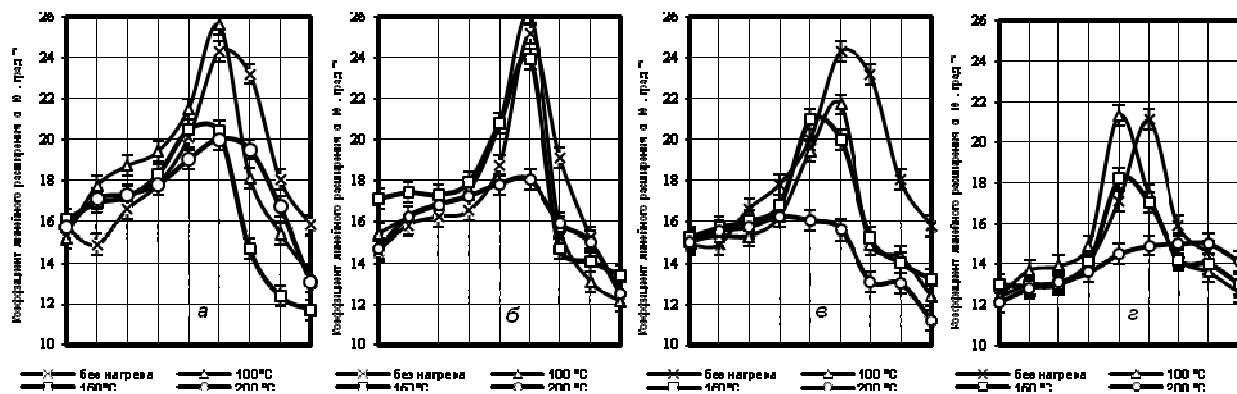


Рис.2. Влияние нагрева (10 ч, воздух) на линейное расширение высококремнистых сплавов Al-Si (обработка расплава парами $CO(NH_2)_2$): а) Al-11%Si, б) Al-20%Si, в) Al-30%Si, г) Al-40%Si

Fig.2. Effect of heating (10 h, air) on linear expansion of high-silicon alloys Al-Si (melt treatment with $CO(NH_2)_2$ vapors): a) Al-11%Si, b) Al-20%Si, c) Al-30%Si, d) Al-40%Si

Обработка расплава смесью карбонатов кальция и магния является дополнительным фактором снижения ТКЛР изучаемых сплавов в интервале температур эксплуатации приборной техники. Предложенный способ обработки расплава способствует снижению значений ТКЛР на 12-17 % в сравнении со сплавами обычного приготовления (табл.2).

Обработка расплава смесью $(CaCO_3 \cdot MgCO_3)$ способствует лучшему усвоению водорода и кислорода, вводимых в расплав, поэтому обработанные сплавы Al-Si об-

ладают повышенными физико-механическими свойствами.

Важно отметить, что модифицирующая смесь содержит частицы тугоплавких оксидов Mg и Ca, которые служат многочисленными дополнительными центрами кристаллизации. Предложенный способ обработки расплава для алюминия и сплавов системы Al-Si является эффективным, т.к. способствует увеличению предельной степени пластической деформации до разрушения в среднем на 7-25 % и снижению ТКЛР на 7-14 % [21].

Таблица 2. Влияние обработки расплава смесью $(CaCO_3 \cdot MgCO_3)$ на линейное расширение сплавов Al-Si

Table 2. Effect of melt treatment with a mixture $(CaCO_3 \cdot MgCO_3)$ on the linear expansion of Al-Si alloys

Сплав	$\alpha \cdot 10^6 \text{ град}^{-1}$, при температурах испытания, °С								
	50	100	150	200	250	300	350	400	450
Al-20%Si									
без обработки расплава	17,4	18,2	18,7	19,2	20,0	19,2	17,2	17,4	17,3
с обработкой расплава	16,0	16,9	18,0	19,3	19,6	24,7	12,8	11,0	9,8
Al-30%Si									
без обработки расплава	15,2	16,1	16,5	17,3	18,9	17,6	17,4	16,9	14,5
с обработкой расплава	13,1	15,2	16,1	17,0	17,7	19,0	16,1	13,0	13,2
Al-40%Si									
без обработки расплава	13,6	13,8	13,1	13,0	13,5	12,8	12,0	11,8	10,9
с обработкой расплава	11,3	13,0	13,3	13,6	14,8	14,8	14,2	13,3	11,9

Заключение

В результате исследования влияния модификаторов сложного состава (сульфат меди, диамид угольной кислоты, смесь карбонатов кальция и магния) на ТКЛР сплавов Al-(11÷40)%Si было установлено, что обработка расплава смесью карбонатов кальция и магния имеет ряд преимуществ. Кроме того, наблюдается снижение ТКЛР обработанных сплавов в интервале температур эксплуатации приборной техники. Таким образом, значения ТКЛР после обработки предложенным способом на 12-17 % ниже, чем у сплавов обычного приготовления. А именно, в интервале температур 50÷150 °C наблюдается снижение средних значений ТКЛР сплава Al-20% с $18 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹ до $16,9 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹. Аналогичным образом, для сплава Al-30%Si средние значения ТКЛР уменьшаются с $16 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹ до $14,2 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹, а для сплава Al-40%Si с $13,2 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹ до $12,6 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹. Модифицирование высококремнистых силуминов (Al-(30÷40)%Si) смесью карбонатов имеет дополнительное преимущество, которое заключается в снижении температуры перегрева расплава с 1100-1200 °C до 900 °C и в сокращении времени выплавки с 5-6 до 1-1,5 ч. Такой эффект связан с понижением термической устойчивости кремния в присутствии доломита. В результате усвоение шихтового кремния алюминиевым расплавом происходит при более низких температурах и за более короткое время.

Список литературы

1. Афанасьев В.К., Попова М.В. Перспективы развития легких сплавов с малым тепловым расширением для космической техники // *Металлургия машиностроения*. 2012. № 6. С. 8–13.
2. Афанасьев В.К., Попова М.В., Самонь В.А. О создании новых легких деформированных сплавов для космической техники // *Металлургия машиностроения*. 2014. № 5. С. 21–28.
3. Афанасьев В.К., Попова М.В., Ружило А.А., Фролов В.Ф. Лёгкие сплавы с малым тепловым расширением. Кемерово: Кузбассвузиздат, 2000. 376 с.
4. Афанасьев В.К., М.В. Попова, С.В. Долгова, А.В. Горшенин, М.А. Малюх Влияние обработки расплава водяным паром на тепловое расширение сплавов Al-20...40%Si // *Металлургия*. 2019. № 1. С. 71–76.
5. Ehrstrom J., Warner T. Metallurgical design of alloys for aerospace structures // *Materials Science Forum*. 2000. V. 331–3. P. 5–16.
6. Xia F., Li J.P., Guo Y.C., Yang Z. Microstructure Evolution and Mechanical Properties of an Al–Si–Cu–Mg–Ni Aluminium Alloy after Thermal Exposure // *Materials Science Forum*. 2013. V. 765. P. 486–490.
7. Jiang Z., Liu X., Jiao S., Han J. Effects of Si, Cu and Mg on the High-Temperature Mechanical Properties of Al–Si–Cu–Mg Alloy // *Advanced Materials Research*. 2013. V. 652–654. P. 1030–1034.
8. Chen C.L., West G.D., Thomson R.C. Characterisation of Intermetallic Phases in Multicomponent Al–Si Casting Alloys for Engineering Applications // *Materials Science Forum*. 2006. V. 519–521. P. 359–364.
9. Hurtalová L., Tillová E., Chalupová M., Belan J. Morphology of intermetallic phases in Al–Si cast alloys and their fracture behaviour // *Production Engineering Archives*. 2015. V. 6, N 1. P. 2–5.
10. Biswas Prosanta, Prasadu Kona, Mondal Manas Effect of Bi addition on microstructure and mechanical properties of hypereutectic Al–17.6Si alloy // *Materials Research Express*. V. 6, N 11. 1165b9.
11. Zhu X.W., Wang R.C., Peng J. Expansion Behavior and Microstructures of Hypereutectic Al–Si Alloys Subjected to Thermal Cycling // *Advanced Materials Research*. 2014. V. 937. P. 145–149.
12. Zu F., Li X. Functions and mechanism of modification elements in eutectic solidification of Al–Si alloys: A brief review // *China Foundry*. 2014. V. 11, N 4. P. 287–295.
13. Li J.H., Albu M., Ludwig T.H., Matsubara Y., Hofer F. et al. Modification of eutectic Si in Al-Si based alloys // *Materials Science Forum*. 2014. V. 794–796. P. 130–136.
14. Колачев Б.А. Водород в металлах и сплавах // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1999. № 3. С. 3–11.
15. Hess P.D., Tumbull G.K. Effects of Hydrogen on Properties of Aluminum Alloys // *Paper from Hydrogen in Metals, American Society for Metals*. 1974. P. 277–287.
16. Борисов Г.П. О роли водорода в формировании структуры и свойств алюминиевых

сплавов // *Металлургия машиностроения*. 2005. № 5. С. 11–20.

17. Goltsov V.A. Fundamentals of hydrogen treatment of materials. In book: *Progress in Hydrogen Treatment of Materials*. Donetsk-Coral Gables: Kassiopeya Ltd., 2001. P. 161–184.

18. Гольцова М.В. Водородные технологии в литье и металлургии: настоящее и будущее (обзор) // *Литье и металлургия*. 2018. Т. 93, № 4. С. 145–154.

19. Афанасьев В.К., Попова М.В., Малюх М.А., Долгова С.В. Об участии водорода в формировании свойств заэвтектических сплавов Al–Si // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2018. Т. 20, № 2. С. 63–74.

20. Афанасьев В.К., Попова М.В., Прудников А.Н. Воздействие водорода на структуру и свойства заэвтектического силумина с 15 % кремния // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2022. Т. 804, № 6. С. 10–16.

21. Попова М.В., Герцен В.В., Доронченко А.В., Афанасьев В.К. Пат. 2136773 РФ. Способ модифицирования алюминия и его сплавов. № 98104521; заявл. 05.03.98; опубл. 10.09.99.

Информация об авторах

М. В. Попова – доктор технических наук, профессор кафедры обработки металлов давлением и материаловедения, ЕВРАЗ ЗСМК Сибирского государственного индустриального университета.

М. А. Малюх – кандидат технических наук, доцент кафедры обработки металлов давлением и материаловедения, ЕВРАЗ ЗСМК Сибирского государственного индустриального университета.

References

1. Afanasiev, V. K. & Popova, M. V. (2012). Prospects for the development of light alloys with low thermal expansion for space technology. *Metallurgy engineering*, (6), 8–13. (In Russ.).

2. Afanasiev, V. K., Popova, M. V. & Samon, V. A. (2014). On the creation of new light deformed alloys for space technology. *Metallurgy engineering*, (5), 21–28. (In Russ.).

3. Afanasiev, V. K., Popova, M. V., Ruzhilo, A. A. & Frolov, V. F. (2000). Light alloys with low thermal expansion. Kemerovo: Kuzbassvuzizdatm. P. 376.

4. Afanasiev, V. K., Popova, M. V., Dolgova, S. V., Gorshenin, A. V. & Malyukh, M. A. (2019). Influence of treatment of the melt with water vapor on the thermal expansion of Al–20...40% Si alloys. *Metallurgist*, (1), 71–76. (In Russ.).

5. Ehrstrom, J. & Warner, T. (2000). Metallurgical design of alloys for aerospace structures. *Materials Science Forum*, 331–3, 5–16.

6. Xia, F., Li, J. P., Guo, Y. C. & Yang, Z. (2013). Microstructure Evolution and Mechanical Properties of an Al–Si–Cu–Mg–Ni Aluminium Alloy after Thermal Exposure. *Materials Science Forum*, 765, 486–490.

7. Jiang, Z., Liu, X., Jiao, S. & Han, J. (2013). Effects of Si, Cu and Mg on the High-Temperature Mechanical Properties of Al–Si–Cu–Mg Alloy. *Advanced Materials Research*, 652–654, 1030–1034.

8. Chen, C. L., West, G. D. & Thomson, R. C. (2006). Characterisation of Intermetallic Phases in Multicomponent Al–Si Casting Alloys for Engineering Applications. *Materials Science Forum*, 519–521, 359–364.

9. Hurtalová, L., Tillová, E., Chalupová, M. & Belan, J. (2015). Morphology of intermetallic phases in Al–Si cast alloys and their fracture behavior. *Production Engineering Archives*, 6(1), 2–5.

10. Biswas, Prosanta & Prasadu, Kona & Mondal, Manas (2019). Effect of Bi addition on microstructure and mechanical properties of hypereutectic Al–17.6Si alloy. *Materials Research Express*, 6(11), 1165b9.

11. Zhu, X. W., Wang, R. C. & Peng, J. (2014). Expansion Behavior and Microstructures of Hypereutectic Al–Si Alloys Subjected to Thermal Cycling. *Advanced Materials Research*, 937, 145–149.

12. Zu, F. & Li, X. (2014). Functions and mechanism of modification elements in eutectic solidification of Al–Si alloys: A brief review. *China Foundry*, 11(4), 287–295.

13. Li, J. H., Albu, M., Ludwig, T. H., Matsubara, Y. & Hofer, F. et al. (2014). Modification of eutectic Si in Al–Si based alloys. *Materials Science Forum*, 794–796, 130–136.

14. Kolachev, B. A. (1999). Hydrogen in metals and alloys. *Metal science and heat treatment of metals*, (3), 3–11. (In Russ.).

15. Hess, P. D. & Tumbull, G. K. (1974). Effects of Hydrogen on Properties of Aluminum Alloys. *Paper from Hydrogen in Metals, American Society for Metals*, 277–287.

16. Borisov, G. P. (2005). On the role of hydrogen in the formation of the structure and properties of aluminum alloys. *Metallurgy engineering*, (5), 11–20. (In Russ.).
17. Goltsov, V.A. (2001). Fundamentals of hydrogen treatment of materials. In book: *Progress in Hydrogen Treatment of Materials*. Donetsk-Coral Gables: Kassiopeya Ltd., 161–184.
18. Goltsova, M. V. (2018). Hydrogen technologies in casting and metallurgy: present and future (review). *Casting and metallurgy*, 93(4), 145–154. (In Russ.).
19. Afanasiev, V. K., Popova, M. V., Malyukh, M. A. & Dolgova, S. V. (2018). On the participation of hydrogen in the formation of properties of hypereutectic Al–Si alloys. *Metal processing (technology, equipment, tools)*, 20(2), 63–74. (In Russ.).
20. Afanasiev, V. K., Popova, M. V. & Prudnikov, A. N. (2022). The effect of hydrogen on the structure and properties of hypereutectic silumin with 15 % silicon. *Metal science and heat treatment of metals*, 804(6), 10–16. (In Russ.).
21. Popova, M. V., Herzen, V. V., Doronchenko, A. V. & Afanasiev, V. K. A method of modifying aluminum and its alloys. Pat. 2136773 RF. 98104521, dec. 03.05.98, publ. 09.10.99. (In Russ.).

Information about the authors

M. V. Popova – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Metalworking and Material Science, EVRAZ ZSMK of the Siberian State Industrial University.

M. A. Malyukh – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Metal Processing by Pressure and Material Science, EVRAZ ZSMK of the Siberian State Industrial University.

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

Статья поступила в редакцию 01.03.2024; одобрена после рецензирования 04.04.2024; принята к публикации 02.05.2024.

The article was received by the editorial board on 01 Mar. 24; approved after reviewing 04 Apr. 24; accepted for publication 02 May 24.