

Научная статья

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

УДК 669.2/8

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2026.02.012

НАСЛЕДСТВЕННОЕ ВЛИЯНИЕ ОБРАБОТКИ РАСПЛАВА НА ТЕПЛОВОЕ РАСШИРЕНИЕ АЛЮМИНИЯ В ТВЕРДОМ СОСТОЯНИИ

Марина Владимировна Попова¹, Марина Александровна Малюх²

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

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

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

Аннотация. В работе отражены результаты экспериментальных исследований возможности снижения температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) технического алюминия марки А7 за счет обработки расплава, которую можно рассматривать как микролегирование.

Изучено влияние комплексного модифицирования, т.е. совместной обработки расплава алюминия карбонатом кальция и присадками различных компонентов, таких как кремний, медь, оксид кремния на тепловое расширение алюминия. Дополнительно с помощью оптического микроскопа исследована микроструктура сплавов Al–1 ÷ 5 % Si после обработки расплава CaCO₃.

Показано, что без введения легирующих элементов за счет обработки расплава смесью карбонатов щелочноземельных металлов, возможно, значительно снизить ТКЛР алюминия технической чистоты в области температур работы приборной техники до значений, характерных для сплавов Al–20 % Si. Установлено, что совместная обработка расплава оксидами легирующих элементов и карбидом кальция обеспечивает наибольшее снижение ТКЛР во всем интервале температур испытания по сравнению с отдельным легированием и обработкой расплава CaCO₃. Полученные результаты могут быть использованы для получения легких сплавов с контролируемым тепловым расширением.

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

Для цитирования: Попова М.В., Малюх М.А. Наследственное влияние обработки расплава на тепловое расширение алюминия в твердом состоянии // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2026. Т. 23, № 2. С. 254-262. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2026.02.012.

Original article

HEREDITARY INFLUENCE OF MELT PROCESSING ON THE THERMAL EXPANSION OF ALUMINUM IN THE SOLID STATE

Marina V. Popova¹, Marina A. Malyukh²

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

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

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

Abstract. The paper reflects the results of experimental studies of the possibility of reducing the temperature coefficient of linear expansion (TCLE) of technical grade A7 aluminum by melt treatment, which can be considered as microalloying.

The effect of complex modification, i.e., the combined treatment of aluminum melt with calcium carbonate and additives containing various components, such as silicon, copper, and silicon oxide, on the thermal expansion of aluminum was studied. Additionally, the microstructure of Al–1 ÷ 5% Si alloys after treatment of the CaCO₃ melt was examined using an optical microscope.

It has been demonstrated that, without the introduction of alloying elements, by treating the melt with a mixture of alkaline earth metal carbonates, it is possible to significantly reduce the TCLE of technical-grade aluminum in the instrumentation temperature range to values characteristic of Al–20% Si alloys. It has been established that combined treatment of the melt with alloying element oxides and calcium carbide provides the greatest reduction temperature coefficient of linear expansion in over the entire test temperature range compared to separate alloying and treatment of the CaCO₃ melt. These results can be used to produce lightweight alloys with controlled thermal expansion.

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

For citation: Popova, M. V., Malyukh, M. A. (2026). Hereditary influence of melt processing on the thermal expansion of aluminum in the solid state. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 23(2), 254-262. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2026.02.012.

Введение

Анализ достижений в области разработки новых способов обработки расплава и микролегирования алюминия и его сплавов, показал, что в последние два десятилетия произошел качественный сдвиг в понимании роли обработки расплава и возможностей микролегирования для управления тепловым расширением.

Проблема снижения ТКЛР алюминия и его сплавов успешно решается комплексным применением методов обработки расплава и микролегирования. Наиболее эффективными подходами являются:

- введение наноразмерных частиц с отрицательным тепловым расширением, позволяющее достичь значений ТКЛР $3\text{--}5 \times 10^{-6}$ град⁻¹ [1–4];

- микролегирование алюминия редкоземельными металлами и формирование интерметаллидных фаз типа Al₂RE с низким собственным ТКЛР [5–7];

- создание градиентных структур, обеспечивающих плавное изменение ТКЛР от высоких до сверхнизких значений в одном материале [8–10];

- модифицирование расплава карбонатами щелочноземельных металлов, обеспечивающее снижение ТКЛР на 15–25% при одновременном сокращении энергозатрат на плавку [11, 12].

В работах [13, 14] показано, что комбинирование методов обработки расплава с последующей термической обработкой позволяет достичь синергетического эффекта снижения ТКЛР.

Авторским коллективом под руководством профессора В.К. Афанасьева было установлено, что на ТКЛР алюминия существенно влияют элементы, образующие в нем твердые растворы

по типу внедрения, прежде всего водород и азот [11].

Следует обратить внимание на несоответствие теоретически рассчитанного по методу Хоутона ТКЛР алюминия при 300 К (27 °С), который равен $16,8 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹ и экспериментально полученного значения $23,3 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹. Возможно, такое расхождение результатов обусловлено наличием примесей, неизбежно присутствующих в электролизном алюминии, вследствие особенностей его получения. Среди этих примесей главная роль принадлежит водороду, так как, в отличие от других элементов внедрения, он активно поглощается алюминием в широком интервале температур [15]. В последнее время появляются работы и других авторов, отмечающие положительное влияние водорода на процесс кристаллизации силуминов, что в свою очередь улучшает их механические и технологические свойства [15].

Изменить содержание водорода в твердом алюминии можно обработкой его расплава водородосодержащими веществами. Большой интерес среди веществ, увеличивающих содержание водорода в алюминии, вызывает смесь карбонатов кальция и магния (CaCO₃ + MgCO₃), которая представляет собой природный минерал – доломит.

Установлено, что применение смеси карбонатов щелочноземельных металлов для модифицирования алюминия и его сплавов существенно улучшает их физико-механические свойства [11, 13]. Для продолжения исследования были более подробно и систематически рассмотрены такие параметры приготовления сплава, как температура и время обработки расплава, температура заливки и способ кристаллизации. Поскольку эффективность обработки расплава смесью карбонатов существенно зависит от всех перечисленных параметров,

главным было определение оптимального их сочетания, позволяющего получить стабильное снижение ТКЛР алюминия.

Материал и методики исследования

Для исследования производили выплавку сплава в закрытой лабораторной печи сопротивления в алундовом тигле. После расплавления алюминия расплав обрабатывали следующими способами:

- смесью карбонатов щелочноземельных металлов ($\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3$), взятых в равном соотношении. Учитывалось влияние степени измельчения фракции доломита на тепловое расширение алюминия: проводилась обработка сухим доломитом крупной фракции (20-30 мм), а также влажным доломитом мелкой фракции (3-5 мм), предварительно смоченным в воде. Смесью вводили в расплав в количестве 1 – 7 % от массы расплава и обработку расплава проводили в течение 3 – 15 минут при температуре, на $50 \div 250$ °С превышающей температуру плавления алюминия, ($710 \div 910$ °С). По окончании обработки с поверхности удаляли шлак и проводили заливку в алюминиевый кокиль со следующих температур: 950-820 °С; 740-720 °С; 670-660 °С;

- вводили легирующие элементы, такие как Si и Cu, затем расплав обрабатывали CaCO_3 отдельно и с SiO_2 . В ходе экспериментов варьировали время воздействия реагента, а также его количество.

Из полученных слитков изготавливали образцы для dilatометрического и металлографического исследования. Сравнение полученных значений ТКЛР обработанного алюминия и алюминия без обработки – показатель возможности снижения ТКЛР алюминия за счет различных технологических приемов, в данном

случае благодаря обработке расплава, которую можно рассматривать как микролегирование.

Dilatометрические исследования проводились на дифференциальном оптическом фоторегистрирующем dilatометре системы Шевенара

(погрешность прибора составляла $\pm 0,1 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹). Металлографические исследования проводили с использованием методов оптической микроскопии (световой микроскоп *OLYMPUS GX51*).

Результаты исследования и их обсуждение

На рисунках 1 и 2 приведены в сравнении значения ТКЛР, полученные после обработки сухим доломитом крупной фракции и влажным доломитом мелкой фракции. Из представленных данных видно, что обработка расплава доломитом приводит к значительному понижению ТКЛР алюминия во всем температурном интервале испытания, независимо от его фракции. Как видно из графиков, наибольшее снижение ТКЛР алюминия обработанного сухим доломитом наблюдается в интервале температур испытания 50 – 300 °С. В случае обработки расплава влажным доломитом мелкой фракции, наибольшее снижение ТКЛР алюминия наблюдается в интервале температур испытания 300 – 450 °С.

Анализируя результаты, полученные при изучении образцов из алюминия, обработанного сухим доломитом крупной фракции (рисунок 1), следует отметить, что наименьшие значения ТКЛР во всем интервале температур испытания имеют образцы, полученные после заливки расплава при температурах 670 и 820 °С. В этом случае получено значение $\alpha_{300} = 8,7 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹ после заливки с 670 °С, а после заливки с 820 °С ТКЛР снижается до $\alpha_{200} = 4,2 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹.

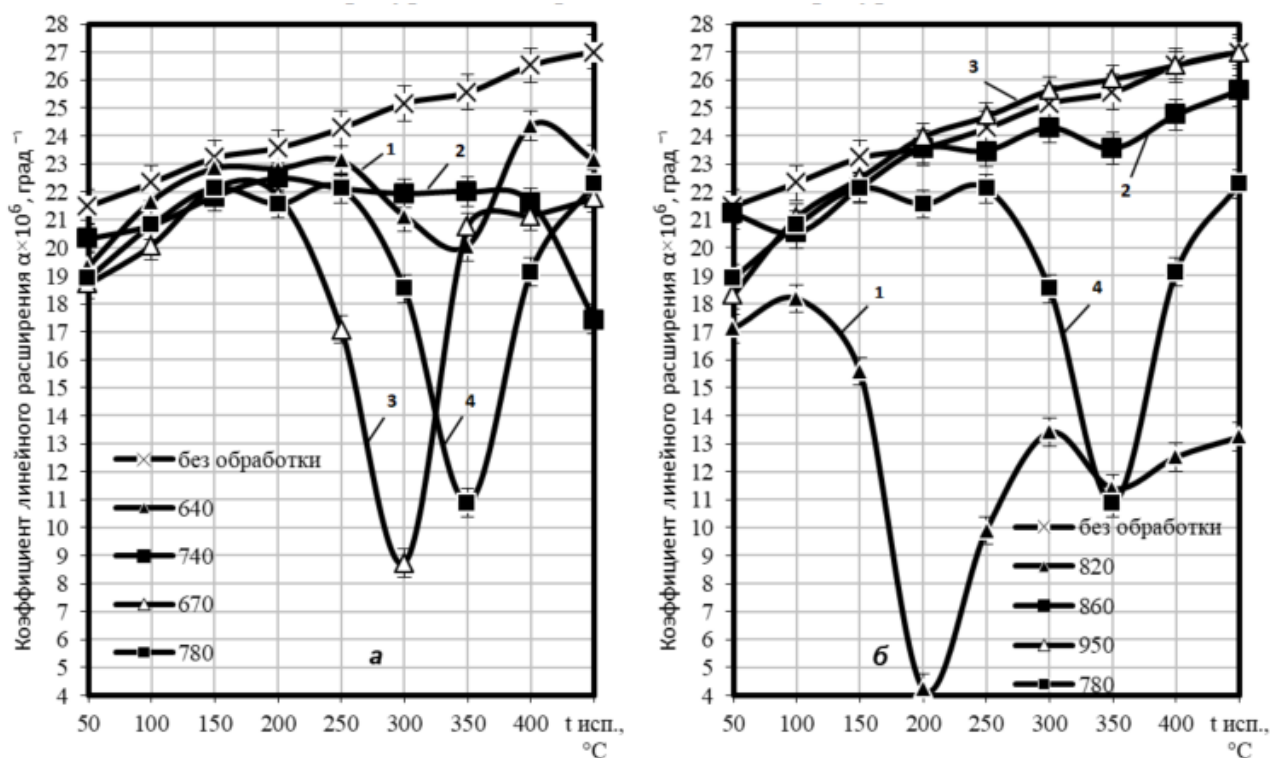


Рисунок 1. Влияние температуры заливки на тепловое расширение алюминия А7 (обработка расплава сухим доломитом крупной фракции)

- а) 1 – температура заливки 640 °С; 2 – температура заливки 740 °С;
3 – температура заливки 670 °С; 4 – температура заливки 780 °С;
б) 1 – температура заливки 820 °С; 2 – температура заливки 860 °С;
3 – температура заливки 950 °С; 4 – температура заливки 780 °С;

Figure 1. The influence of pouring temperature on the thermal expansion of A7 aluminum

(processing of the melt with dry coarse dolomite)

- а) 1 – pouring temperature 640 °С; 2 – pouring temperature 740 °С;
3 – pouring temperature 670 °С; 4 – pouring temperature 780 °С;
б) 1 – pouring temperature 820 °С; 2 – pouring temperature 860 °С;
3 – pouring temperature 950 °С; 4 – pouring temperature 780 °С;

После обработки расплава влажным доломитом мелкой фракции (рисунок 2) наблюдается резкое снижение ТКЛР в интервале температур испытания 300–400 °С образцов, залитых при температурах 660 и 720 °С. В этом случае может быть получено значение $\alpha_{350} = 9,9 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹ после заливки с 720 °С, после заливки с 660 °С ТКЛР снижается до $\alpha_{350} = 1,3 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹.

Появление минимумов значений ТКЛР в интервале 200–350 °С (рисунок 1) и 300–400 °С (рисунок 2) можно объяснить следующим образом. Обработка расплава карбонатами (особенно влажным доломитом мелкой фракции) приводит к наводороживанию расплава и последующему выделению избыточного водорода при кристаллизации. Это вызывает образование

наноразмерных дефектов и локальных областей с искажённой решёткой, которые при нагреве релаксируют, что частично компенсирует ангармонизм решёточных колебаний и даёт локальное снижение ТКЛР. Кроме того, при нагреве возможно частичное растворение/перестройка метастабильных гидридоподобных комплексов, что также даёт аномальное снижение ТКЛР.

При обработке расплава сухим доломитом основной вклад в тепловое расширение дают оксидные нановключения, которые стабильны до ~300 °С. Выше этой температуры начинается их коагуляция и частичное растворение, эффект снижения ТКЛР ослабевает, следовательно

но минимум наблюдается именно при 200–350 °С.

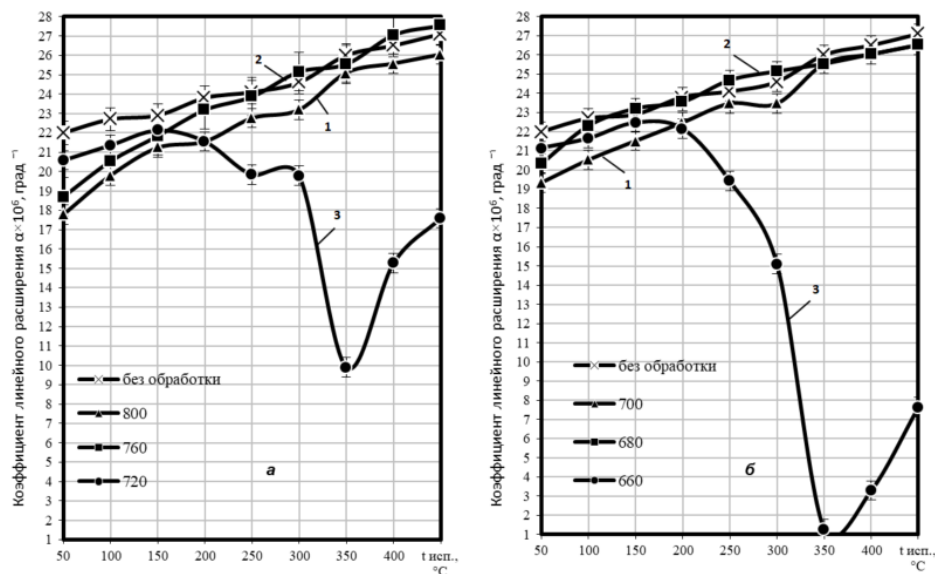


Рисунок 2. Влияние температуры заливки на тепловое расширение алюминия А7 (обработка расплава мокрым доломитом мелкой фракции)

- а) 1 – температура заливки 800 °С; 2 – температура заливки 760 °С; 3 – температура заливки 720 °С;
 б) 1 – температура заливки 700 °С; 2 – температура заливки 680 °С; 3 – температура заливки 660 °С;

Figure 2. The influence of pouring temperature on the thermal expansion of A7 aluminum (processing of the melt with wet dolomite of fine fraction)

- а) 1 – pouring temperature 800 °С; 2 – pouring temperature 760 °С; 3 – pouring temperature 720 °С;
 б) 1 – pouring temperature 700 °С; 2 – pouring temperature 680 °С; 3 – pouring temperature 660 °С;

При обработке расплава влажным доломитом водород частично остаётся в твёрдом растворе (до 0,002–0,004 мас.%) и образует метастабильные гидридоподобные комплексы Al–H. При нагреве в интервале 300–400 °С происходит распад этих комплексов, выделение водорода сопровождается релаксацией локальных искажений решётки. Этот процесс противодействует нормальному тепловому расширению, создавая дополнительный минимум ТКЛР при более высоких температурах. Оксидные наночастицы также присутствуют, но их вклад перекрывается более сильным водородным эффектом именно в области 300–400 °С.

Таким образом, оба типа обработки дают минимумы ТКЛР, но в разных температурных интервалах, что зависит от состояния реагента (сухой/влажный) и его дисперсности. Это указывает на общий механизм влияния обработки расплава на дефектную субструктуру твёрдого алюминия, связанный с водородом и оксидными наночастицами.

Изучалось также влияние комплексного модифицирования, т.е. совместной обработки расплава алюминия карбонатом кальция и при-

садками различных компонентов, таких как кремний, медь, оксид кремния. При создании легких сплавов с требуемым значением ТКЛР особое внимание уделяется легированию кремнием. Объяснение этому, в первую очередь, базируется на том, что кремний имеет более высокую температуру плавления, малую плотность и значительно меньший ТКЛР по сравнению с алюминием.

Дилатометрические исследования показали, что введение в обработанный расплав небольшого количества кремния (1% и 5%) приводит к снижению ТКЛР алюминия в интервале 50 ÷ 250 °С, причем это снижение тем значительней, чем выше содержание кремния в расплаве (таблица 1). Для сравнения представлены средние значения ТКЛР образцов без обработки и предварительно обработанных CaCO₃.

Легирование алюминия 1% Si дает снижение ТКЛР на 1 – 3% в интервале температур испытания 50 ÷ 150 °С. Легирование 5% Si дает снижение ТКЛР на 5 – 7% в этом же интервале температур ($\alpha = 19,3 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹, тогда как ТКЛР алюминия обработанного CaCO₃, равен $20,7 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹).

Микроструктура сплава с 1% Si после обработки расплава CaCO_3 представляет собой зеренную структуру с сильно травящимися границами и повышенной травимостью по телу зерна (рисунок 3 а, б). Микроструктура сплава с 5% Si исходного образца и после обработки расплава CaCO_3 представлена на рисунке 3 в, г. Показано, что обработка расплава способствует формированию более тонкой дендритной

структуры. На снимке четко видны более сильно травящиеся границы светлых ветвей дендритов α -твердого раствора кремния в алюминии.

Детальный анализ фазового состава и тонкой структуры методами сканирующей электронной микроскопии и рентгенофазового анализа планируется представить в последующих работах.

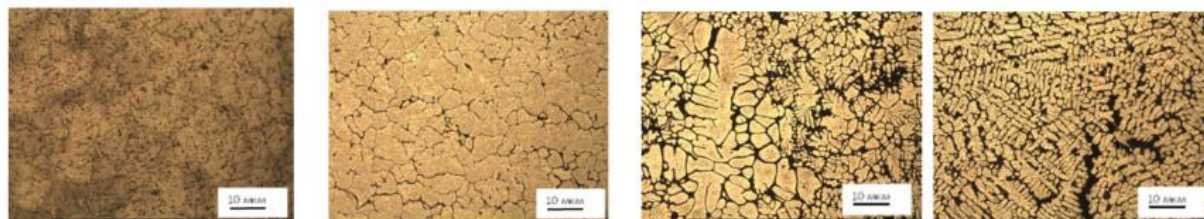


Рисунок 3. Микроструктура сплавов Al-1% Si x100 и Al-5% Si x100 (*а* – сплав Al-1%Si без обработки, *б* – сплав Al-1%Si обработка расплава CaCO_3 , *в* – сплав Al-5%Si без обработки, *г* – сплав Al-5%Si обработка расплава CaCO_3)

Figure 3. Microstructure of Al-1% Si x100 and Al-5% Si x100 alloys (*a* – Al-1%Si alloy without processing, *b* – Al-1%Si melt processing CaCO_3 , *v* – Al-5%Si alloy without processing, *z* – Al-5%Si melt processing CaCO_3)

Известно, что для модифицирования структуры алюминиевых сплавов применяют оксиды легирующих элементов [11]. Например, эффективными способами модифицирования структуры и повышения механических свойств силуминов являются обработка расплава смесью фосфористой меди (Cu_3P) и оксида меди (CuO), а также обработка расплава смесью фосфористой меди (Cu_3P) и оксида свинца (PbO).

При этом наиболее эффективно проявляется модифицирующее воздействие оксидов сов-

местно с наводороживанием расплава. Нами изучено влияние обработки расплава смесью ($\text{CaCO}_3 + 5\% \text{SiO}_2$) на ТКЛР алюминия. Данный вид обработки приводит к снижению ТКЛР на 10–20 % в интервале температур $50 \div 250$ °С по сравнению с исходным алюминием и на 3–5 % по сравнению с алюминием, обработанным CaCO_3 , что видно в таблице 1.

Таблица 1. Влияние обработки расплава и легирования на ТКЛР алюминия

Table 1. The influence of melt processing and alloying on the thermal expansion coefficient of aluminum

Обработка расплава	Средний ТКЛР $\alpha \times 10^6$ град ⁻¹ в интервале температур, °С		
	50 - 100	150 - 250	300 - 450
Без обработки	21,9	23,7	26,1
1 % Si	20,7	23,7	29,9
5 % Si	20,6	23,9	27,1
5 % Cu	22,1	24,2	26,6
$\text{CaCO}_3 + 1\% \text{Si}$	19,5	23,5	27,9
$\text{CaCO}_3 + 5\% \text{Si}$	18,5	22,6	26,5
$\text{CaCO}_3 + 5\% \text{Cu}$	18,5	22,4	24,7
$\text{CaCO}_3 + 5\% \text{SiO}_2$	18,6	22,3	24,5

При температуре 300 °С наблюдается значительное увеличение ТКЛР на 8% как по сравнению с исходным, так и в сравнении с предварительно обработанным алюминием. В интервале температур 350 ÷ 450 °С наблюдается снижение ТКЛР, причем минимальное значение при температуре испытания 400 °С составляет 17% от значений исходного алюминия.

Таким образом, совместная обработка расплава оксидами легирующих элементов и карбонатом кальция обеспечивает наибольшее снижение ТКЛР во всем интервале температур испытания по сравнению с отдельным легированием и обработкой расплава CaCO_3 . На основании полученных данных можно утверждать, что с помощью обработки расплава смесью ($\text{CaCO}_3 + 5\% \text{SiO}_2$) возможно получить алюминий, имеющий значения ТКЛР, такие же, как у силуминов, легированных 11–20% Si.

Заключение

В результате исследования влияния обработки расплава смесью карбонатов ($\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3$) на тепловое расширение алюминия марки А7 было установлено, за счет обработки расплава смесью карбонатов щёлочноземельных металлов без введения легирующих элементов возможно получить значения ТКЛР алюминия, равнозначные значениям ТКЛР сплава Al-20%Si $\alpha_{50} = 17,1 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹ и $\alpha_{100} = 18,2 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹ в области температур испытания 50 ÷ 100 °С, что очень важно для приборной техники.

Обнаруженные минимумы ТКЛР при 200–350 °С (сухой доломит) и 300–400 °С (влажный доломит) имеют единую наследственную природу, но разный доминирующий механизм: упругая компенсация на наночастицах оксидов и релаксация при распаде гидридоподобных комплексов соответственно.

Исследования влияния совместной обработки расплава алюминия карбонатом кальция и присадками различных компонентов, таких как кремний, медь, оксид кремния показали, что совместная обработка расплава оксидами легирующих элементов и карбонатом кальция обеспечивает наибольшее снижение ТКЛР во всем интервале температур испытания по сравнению с отдельным легированием или обработкой только CaCO_3 .

Список литературы

1. Takenaka K. Negative thermal expansion materials: technological key for control of thermal expansion // *Science and Technology of Advanced Materials*. – 2012. – Vol. 13, № 1. – Article 013001. – DOI: 10.1088/1468-6996/13/1/013001.
2. Huang R., et al. Giant negative thermal expansion in NaZn13-type La (Fe, Si, Co)₁₃ compounds // *Journal of Applied Physics*. – 2013. – Vol. 113, № 2. – Article 023517. – DOI: 10.1063/1.4774213.
3. Liu X., Zhang Y., Beaudoin A.J. Nanoscale precipitate effects on thermal expansion of Al–Cu alloys // *Acta Materialia*. 2020. Vol. 195. P. 321–330. – DOI: 10.1016/j.actamat.2020.04.020.
4. Dong B.K., Wei C.L., Lin J.C., et al. A biomimetic aluminum composite exhibiting gradient-distributed thermal expansion, high thermal conductivity, and highly directional toughness // *Journal of Materials Science & Technology*. – 2024. – Vol. 212. – P. 143–152. – DOI: 10.1016/j.jmst.2024.07.008.
5. 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, № 1. – P. 3–29. – DOI: 10.1179/095066001225001049.
6. Ma T., Liu W., Ren Y., Liu T., Li Y. Stabilities, mechanical and thermodynamic properties of Al–RE intermetallics: A first-principles study // *Journal of Rare Earths*. – 2022. – Vol. 40, № 2. – P. 345–352. – DOI: 10.1016/j.jre.2020.11.009.
7. Forbord B., et al. Grain refinement of AA6060 after addition of Al–Ti–B master alloys // *Materials Science and Engineering: A*. – 2006. – Vol. 420, № 1–2. – P. 263–273. – DOI: 10.1016/j.msea.2006.01.038.
8. Tonyali B., Sun H., Liu Z.-K., Keist J., Beese A.M. Tailoring the coefficient of thermal expansion in a functionally graded material: Al alloyed with Ti-6Al-4V using additive manufacturing // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2024. – Vol. 1009. – Article 176971. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2024.176971.
9. Zhang L., et al. Spark Plasma Sintering of AlN/Al Functionally Graded Materials // *Materials*. – 2021. – Vol. 14, № 17. – Article 4893. – DOI: 10.3390/ma14174893.

10. Radhika N., et al. Processing and Characterization of Functionally Graded Aluminum (A319)–SiCp Metallic Composites by Centrifugal Casting Technique // *Metallurgical and Materials Transactions A*. – 2017. – Vol. 48, No. 10. – P. 4567–4580. – DOI: 10.1007/s11661-017-4262-9.

11. Афанасьев, В. К. Лёгкие сплавы с малым тепловым расширением / В.К. Афанасьев, М.В. Попова, А.А. Ружило, В.Ф. Фролов. – Кемерово : Кузбассвузиздат, 2000. – 376 с.

12. Слетова Н.В. Термодинамическое моделирование химических реакций карбоната кальция в расплаве алюминия / Н.В. Слетова, В.А. Чайкин, С.П. Задрецкий, В.А. Розум, С.А. Панасюгин // *Литейщик России*. – 2013. – № 4. – С. 31-35.

13. Попова, М. В. Тепловое расширение алюминиевых сплавов специального назначения после обработки расплава и термообработки / М.В. Попова, М.А. Малюх // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. – 2024. – Т. 21. – № 2. – С. 239-245.

14. Афанасьев, В. К. Особенности структурообразования и свойства высоколегированных сплавов специального назначения системы Al–Si–Cu / В.К. Афанасьев, М.В. Попова, М.А. Малюх // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2022. – № 11 (809). – С. 48-53. – DOI: 10.30906/mitom.2022.11.48-53.

15. Королев, С. П. Разработка и использование комплексных препаратов для рафинирования и модифицирования алюминиевых сплавов / С. П. Королев, А. М. Галушко, В. М. Михайловский // *Литье и металлургия*. – 2011. – № 3 (52). – С. 51–57.

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. Takenaka, K. (2012). Negative thermal expansion materials: technological key for control of thermal expansion. *Science and Technology of Advanced Materials*, 13(1), Article 013001. – DOI: 10.1088/1468-6996/13/1/013001.

2. Huang, R., et al. (2013). Giant negative thermal expansion in NaZn₁₃-type La (Fe, Si, Co)₁₃ compounds. *Journal of Applied Physics*, 113(2), Article 023517. – DOI: 10.1063/1.4774213.

3. Liu, X., Zhang, Y., Beaudoin, A.J. (2020) Nanoscale precipitate effects on thermal expansion of Al–Cu alloys. *Acta Materialia*, 195, 321–330. – DOI: 10.1016/j.actamat.2020.04.020.

4. Dong, B.K., Wei, C.L., Lin, J.C., et al. (2024). A biomimetic aluminum composite exhibiting gradient-distributed thermal expansion, high thermal conductivity, and highly directional toughness. *Journal of Materials Science & Technology*, 212, 143–152. – DOI: 10.1016/j.jmst.2024.07.008.

5. Murty, B.S., Kori, S.A., Chakraborty, M. (2002). Grain refinement of aluminium and its alloys by heterogeneous nucleation and alloying. *International Materials Reviews*, 47(1), 3–29. – DOI: 10.1179/095066001225001049.

6. Ma, T., Liu, W., Ren, Y., Liu, T., Li, Y. (2022). Stabilities, mechanical and thermodynamic properties of Al–RE intermetallics: A first-principles study. *Journal of Rare Earths*, 40(2), 345–352. DOI: 10.1016/j.jre.2020.11.009.

7. Forbord, B., et al. (2006). Grain refinement of AA6060 after addition of Al–Ti–B master alloys. *Materials Science and Engineering*, 420(1–2), 263–273. – DOI: 10.1016/j.msea.2006.01.038.

8. Tonyali, B., Sun, H., Liu, Z.-K., Keist, J., Beese, A.M. (2024). Tailoring the coefficient of thermal expansion in a functionally graded material: Al alloyed with Ti–6Al–4V using additive manufacturing. *Journal of Alloys and Compounds*, 1009, Article 176971. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2024.176971.

9. Zhang, L., et al. (2021). Spark Plasma Sintering of AlN/Al Functionally Graded Materials. *Materials*, 14(17), Article 4893. – DOI: 10.3390/ma14174893.

10. Radhika, N., et al. (2017). Processing and Characterization of Functionally Graded Aluminum (A319)–SiCp Metallic Composites by Centrifugal Casting Technique. *Metallurgical and Materials Transactions*, 48(10), 4567–4580. – DOI: 10.1007/s11661-017-4262-9.
11. Afanasyev, V.K., Popova, M.V., Ruzhilo, A.A. & Frolov, V.F. (2000). Light alloys with low thermal expansion. Kemerovo: Kuzbassvuzdat. 376.
12. Sletova, N.V., Chaikin, V.A., Zadrutsky, S.P., Rozum, V.A., Panasyugin, S.A. (2013). Thermodynamic modeling of chemical reactions of calcium carbonate in aluminum melt. *Foundryman of Russia*, (4), 31-35.
13. Popova, M. V. & Malyukh, M. A. (2024). Thermal expansion of special-purpose aluminum alloys after melt processing and heat treatment. *Fundamentalnye problemy sovremenogo materialovedeniya*, 21(2), 239-245.
14. Afanasiev, V.K., Popova, M.V. & Malyukh, M.A. (2022). Features of structure formation and properties of high-alloy special-purpose alloys of the Al-Si-Cu system. *Metal science and heat treatment of metals*, 809(11), 48–53. DOI: 10.30906/mitom.2022.11.48-53.
15. Korolev, S.P., Galushko, A.M., Mikhailovsky, V.M. (2011). Development and use of complex preparations for refining and modifying aluminum alloys. *Casting and metallurgy*, 3 (52), 51-57.

Information about the authors

M.V. Popova – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Metalworking and Metal 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 Metal 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 03.03.2026; одобрена после рецензирования 25.05.2026; принята к публикации 01.06.2026.

The article was received by the editorial board on 03 Mar. 2026; approved after reviewing 25 May 2026; accepted for publication 01 Jun. 2026.