

Оригинальная статья

УДК 669.71

DOI: 10.57070/2304-4497-2023-3(45)-9-18

ВЛИЯНИЕ ЦЕРИЯ НА ТЕМПЕРАТУРНУЮ ЗАВИСИМОСТЬ ТЕПЛОЕМКОСТИ И ИЗМЕНЕНИЯ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ СПЛАВА $\text{AlCu}_{4,5}\text{Mg}_1$

© 2023 г. И. Н. Ганиев¹, М. М. Саидов², У. Н. Файзуллоев³, И. Т. Амонзода⁴

¹Институт химии им. В.И. Никитина НАН Таджикистана (Республика Таджикистан, 734063, Душанбе, ул. Айни, 299/2)

²Республиканский медицинский колледж (Республика Таджикистан, 734063, Душанбе, 38XV+C86)

³Филиал Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» в г. Душанбе (Республика Таджикистан, 734042, Душанбе, ул. Назаршоева, 7)

⁴Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими (Республика Таджикистан, 734042, Душанбе, пр. Академиков Раджабовых, 10)

Аннотация. Применение алюминия и его сплавов как конструкционных материалов обусловлено их стойкостью к коррозии. Алюминиевые сплавы обладают высокой стойкостью к коррозии в атмосферных и морских условиях, в щелочных растворах и растворах кислот с малой плотностью, хорошо обрабатываются резанием. Высокая коррозионная стойкость алюминиевых сплавов в различных средах определяется образованием оксидной пленки, задерживающей коррозионный процесс. Высокая прочность сплавов системы $\text{Al} - \text{Cu} - \text{Mg}$ связана с увеличением искажения кристаллической решетки с повышением содержания меди и магния в твердом растворе. Для повышения коррозионных и механических свойств в алюминиевые сплавы вводят добавки различных металлов. Одной из важнейших характеристик алюминиевых сплавов является теплоемкость. Знание теплоемкости и ее температурной зависимости имеет большое значение в исследованиях сплавов. В настоящей работе проведено изучение температурной зависимости теплофизических свойств и термодинамических функций алюминиевого сплава $\text{AlCu}_{4,5}\text{Mg}_1$ с церием. В работе применяется метод сравнения кривых охлаждения эталонного и исследуемого образцов с использованием алюминиевого эталона (алюминий А5N) в интервале 300 – 800 К. Впервые исследовано влияние добавки церия на теплофизические свойства и изменения термодинамических функций алюминиевого сплава $\text{AlCu}_{4,5}\text{Mg}_1$. Установлены математические модели, которые описывают температурную зависимость теплоемкости сплава от содержания церия и изменение термодинамических функций в указанном температурном диапазоне. С ростом температуры теплоемкость, энтальпия и энтропия сплавов увеличиваются, а значение энергии Гиббса уменьшается. Полученные характеристики и термодинамические функции алюминиевых сплавов $\text{AlCu}_{4,5}\text{Mg}_1$ с церием пополняют базы данных материалов и могут использоваться при проектировании деталей машин из указанных сплавов.

Ключевые слова: сплав $\text{AlCu}_{4,5}\text{Mg}_1$, церий, удельная теплоемкость, режим охлаждения, коэффициент теплоотдачи, термодинамические функции

Для цитирования: Саидов М.М., Файзуллоев У.Н., Амонзода И.Т. Влияние церия на температурную зависимость теплоемкости и изменения термодинамических функций сплава $\text{AlCu}_{4,5}\text{Mg}_1$ // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2023. № 3 (45). С. 9 – 18. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-3\(45\)-9-18](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-3(45)-9-18)

Original article

INFLUENCE OF CERIUM ON THE TEMPERATURE DEPENDENCE OF THE HEAT CAPACITY AND CHANGES IN THE THERMODYNAMIC FUNCTIONS OF ALLOY AlCu4.5Mg1

© 2023 I. N. Ganiev¹, M. M. Saidov², U. N. Faizulloev³, I. T. Amonzoda⁴

¹**Institute of Chemistry, in and. Nikitin National Academy of Sciences of Tajikistan** (299/2, st. Aini, Dushanbe, 736043, Republic of Tajikistan)

²**Republican Medical College** (38XV+C86, Dushanbe, 736043, Republic of Tajikistan)

³**Branch of the National Research Technological University "MISiS" in Dushanbe** (7, st. Nazarshoeva, Dushanbe, 734042, Republic of Tajikistan)

⁴**Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi** (10, Akademikov Radzhabov Ave., Dushanbe, 734042, Republic of Tajikistan)

Abstract. Statement of the problem (relevance of the work): The use of aluminum and its alloys as structural materials is due to their resistance to corrosion. Aluminum alloys have high resistance to corrosion in atmospheric and marine conditions, in alkaline and acid solutions, low density, good machinability. In terms of corrosion resistance, these alloys are significantly superior to cast alloys of other aluminum-based systems. The high corrosion resistance of aluminum alloys in various media is determined by the formation of a hydrated film that delays the corrosion process. The high strength of the alloys of this system is associated with an increase in the distortion of the crystal lattice with an increase in the content of copper and magnesium in the solid solution. To improve the corrosion and mechanical properties, additives of various metals are introduced into aluminum alloys. One of the most important characteristics of aluminum alloys is heat capacity. Knowledge of the heat capacity and its temperature dependence plays an important role in the study of alloys. The purpose of the work: to study the temperature dependence of the thermophysical properties and thermodynamic functions of the AlCu4.5Mg1 aluminum alloy with cerium. Methods used: Many methods are known for measuring the heat capacity of a solid. In this work, a method is used to compare the cooling curves of the reference and test samples in the "cooling" mode using an aluminum standard (Al A5N) in the range of 300 – 800 K. 5Mg1. Result: mathematical models have been established that describe the temperature dependence of the heat capacity of the alloy on the cerium content and the change in their thermodynamic functions in the specified temperature range. As a result of the studies carried out, it was shown that with increasing temperature, the heat capacity, enthalpy and entropy of alloys increase, and the value of the Gibbs energy decreases. Practical significance: the obtained characteristics of thermophysical properties and thermodynamic functions of aluminum alloy AlCu4.5Mg1 with cerium fill up the pages of the relevant reference books on the thermophysics of materials and can be used in the design of parts and machines from these alloys.

Keywords: AlCu4.5Mg1 aluminum alloy, cerium, specific heat capacity, "cooling" mode, heat transfer coefficient, thermodynamic functions

For citation: Ganiev I.N., Saidov M.M., Faizulloev U.N., Amonzoda I.T. Influence of cerium on the temperature dependence of heat capacity and changes in the thermodynamic functions of alloy AlCu4.5Mg1. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2023, no. 3 (45), pp. 9 – 18. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-3\(45\)-9-18](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-3(45)-9-18)

Введение

В настоящее время алюминий и его сплавы по объемам производства и потребления занимают второе место после стали. В последние десятилетия производство алюминия развивается опережающими темпами. Сферы потребления алюминия постоянно расширяются. В ряде областей промышленности он успешно вытесняет традиционно применяемые металлы и сплавы [1, 2].

Одним из мощных стимулов развития технологии плавки и литья алюминиевых сплавов является постоянное повышение требований к качеству материалов авиационного назначения и ряда других материалов. Для освоенных новых высокопрочных литейных и деформируемых сплавов потребовались усовершенствования процессов литья [3 – 5].

Алюминиевые деформируемые сплавы являются основным конструкционным материалом в самолетостроении, а также широко используются и в

других отраслях промышленности. Применение алюминиевых сплавов в строительстве дало возможность архитекторам создавать красивые, легкие, но в то же время очень прочные здания и сооружения. Использование алюминиевых сплавов в судостроении позволило создать новые типы скоростных комфортабельных кораблей. Возрастает применение алюминиевых сплавов на транспорте, в химической и пищевой промышленности, в сельском хозяйстве. Новые области применения сплавов, более совершенные конструкции требуют создания новых высокопрочных, коррозионностойких, хорошо сваривающихся алюминиевых сплавов и усовершенствования технологических процессов их обработки [6 – 8].

Широко применяемые сплавы системы Al – Cu – Mg были разработаны в 1909 г. после открытия А. Вильмом эффекта упрочнения алюминия с добавками меди и магния. Такой сплав после нагрева до 500 °С, охлаждения в воде и выдержки в течение 4 сут при комнатной температуре имел повышенные прочность и твердость, сохраняя относительное удлинение (эффект естественного старения). Упрочнение сплава Al – Cu – Mg (дюралюминов по имени помощника Цепелина-Дюрра) происходит благодаря изменению и искажению кристаллической решетки при образовании дискообразных участков меди, так называемых зон Гинье-Престона [7].

Сплавы системы Al – Cu – Mg (дюралюмины) представляют собой наиболее старую и наиболее важную по своему значению группу сплавов, нашедших широкое применение в различных отраслях машиностроения и особенно в авиации. Наиболее важные сплавы в группе дюралюминов – сплав Д16 и его улучшенные модификации Д16ч и 1163, которые применяются в основном в естественно состаренном состоянии. Эти сплавы характеризуются хорошим сочетанием вязкости разрушения, выносливости, скорости роста усталостной трещины. По прочности и по коррозионной стойкости эти сплавы уступают высокопрочным сплавам системы Al – Zn – Mg – Cu (В95, В95пч, В95оч), однако имеют преимущество перед сплавами типа В95 по выносливости, сопротивлению росту усталостной трещины при одинаковой относительной прочности и уровнях напряжений и плотности. Поэтому сплавы 1163, Д16ч применяются для изготовления деталей с повышенной выносливостью в условиях растягивающих напряжений [7, 9].

Режим старения дюралюминов заключается в выдерживании сплавов после закалки в течение 4 – 5 сут при комнатной температуре (естественное старение) или кратковременной выдержке при нагреве (искусственное старение) [6].

Церий добавляют в литейные сплавы в основном в виде мишметалла (смесь редкоземельных металлов, содержащая 50 – 60 % Се) для повышения жидкотекучести и уменьшения налипания металла на стенки формы [6].

Целью настоящей работы является исследование влияния добавки церия на теплофизические свойства и термодинамические функции алюминиевого сплава AlCu4,5Mg1 типа дюралюминия, так как подобные сведения в литературе отсутствуют.

Материалы и методика исследования

Теплоемкость C_p – это количество теплоты, которое поглощает тело в процессе нагревания на один градус при постоянном давлении. То же самое справедливо и для отвода теплоты в процессе охлаждения. При более точном математическом описании рассматривается количество теплоты δQ_p , поглощенное (или отданное) системой при бесконечно малом изменении температуры dT . Если теплоемкость системы отнести к ее массе m , то получаем удельную теплоемкость C_{p2}^0 , определяемую по формуле

$$C_{p2}^0 = \frac{\delta Q}{mdT}. \quad (1)$$

В представленной формуле δ означает, что теплота является функцией процесса, а d – что температура является функцией состояния системы. Теплоемкость сплавов определяли по формуле

$$C_{p2}^0 = \frac{C_{p1}^0 m_1 \left(\frac{dT}{d\tau} \right)_1}{m_2 \left(\frac{dT}{d\tau} \right)_2}, \quad (2)$$

где $m_1 = \rho_1 V_1$ – масса эталона; $m_2 = \rho_2 V_2$ – масса исследуемого образца; $\left(\frac{dT}{d\tau} \right)_1$, $\left(\frac{dT}{d\tau} \right)_2$ – скорости охлаждения эталона и изучаемых образцов при данной температуре.

Правомочность использования уравнения (2) для определения теплоемкости показана в работах [10 – 17].

Для определения теплоемкости строят кривые охлаждения исследуемых образцов и эталона (алюминий А5N). Кривая охлаждения представляет собой зависимость температуры образца от времени при охлаждении его в неподвижном воздухе. Алюминиевый сплав AlCu4,5Mg1 с церием получали в шахтной лабораторной печи

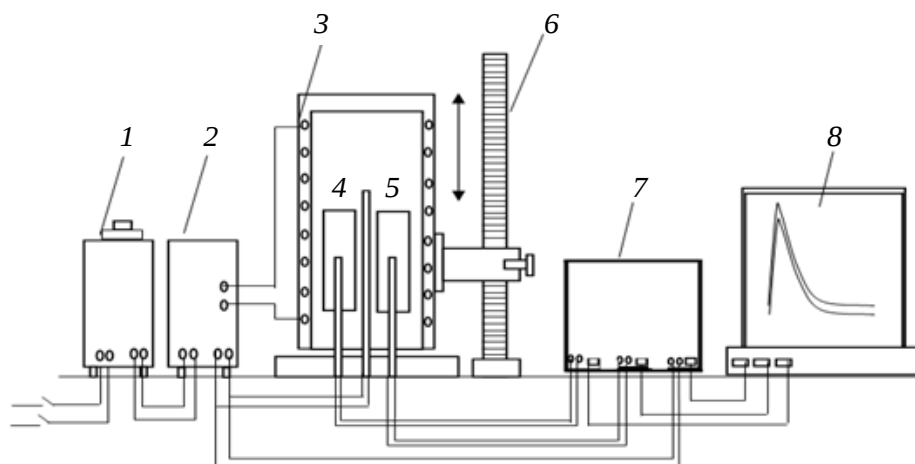


Рис. 1. Установка для определения теплоемкости твердых тел в режиме «охлаждения»
Fig. 1. Installation for determining the heat capacity of solids in the "cooling" mode

сопротивления типа СШОЛ при температуре 750 – 800 °С. Содержание церия в сплавах варьировали в пределах 0,01 – 1,00 % (по массе). Из полученных сплавов отливали цилиндрические образцы диаметром 16 мм и длиной 30 мм в графитовую изложницу. Содержание основных компонентов сплава определяли в Центральной заводской лаборатории ОАО «ТалКо». Содержание церия в сплавах определяли гравиметрическим методом путем перевода его в оксалат.

Измерение теплоемкости проводилось по методике, описанной в работах [18 – 21] на установке, схема которой представлена на рис. 1. Установка состоит из следующих узлов: электропечь 3 смонтирована на стойке 6, по которой она может перемещаться вверх и вниз (стрелкой показано направление перемещения). Образец 4 и эталон 5 (тоже могут перемещаться) представляют собой цилиндры длиной 30 мм и диаметром 16 мм с высверленными каналами с одного конца, в которые вставлены термодатчики 4 и 5. Концы термодатчиков подведены к цифровому многоканальному термометру 7, который подсоединен к компьютеру 8.

Электропечь 3 включается через автотрансформатор 1, с помощью терморегулятора 2 устанавливается нужная температура. По показаниям цифрового многоканального термометра 7 отмечается значение начальной температуры. Измеряемый образец 4 и эталон 5 устанавливаются в электропечь 3 и нагреваются до нужной температуры, проводится контроль температуры по показаниям цифрового многоканального термометра на компьютере 8. Далее измеряемый образец и эталон одновременно вынимаются из электропечи. С этого момента фиксируется снижение температуры. Записываются показания цифровых термометров на компьютере через фиксированное время 10 с. Образец и эталон охлаждаются до температуры ниже 30 °С.

Обработку результатов измерений и построение графиков проводили с помощью программ MS Excel и Sigma Plot. Значения коэффициента корреляции ($R^2 \geq 0,9998$) подтверждают правильность выбора аппроксимирующей функции. Относительная ошибка измерения температуры в интервале от 40 до 400 °С составляла ± 1 %, а в интервале более 400 °С – $\pm 2,5$ %. Погрешность измерения теплоемкости по предлагаемой методике не превышает 4 %. В рассматриваемом случае погрешность измерения теплоемкости составляла не более 1,2 %.

Экспериментально полученные временные зависимости температуры образцов описывают уравнения вида

$$T = ae^{-b\tau} + pe^{-k\tau}, \quad (3)$$

где a , b , p , k – постоянные для данного образца; τ – время охлаждения.

Дифференцируя уравнение (3) по времени τ , получаем уравнение для определения скорости охлаждения образцов

$$\frac{dT}{d\tau} = -abe^{-b\tau} - pk^{-k\tau} \quad (4)$$

По этой формуле были вычислены скорости охлаждения эталона (алюминий А5N) и образцов из алюминиевого сплава AlCu_{4,5}Mg1 с церием.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

По результатам проведенных экспериментов построены зависимости температуры образцов от времени охлаждения (рис. 2, а). Зависимости скорости охлаждения образцов от температуры, вычисленные по формуле (4), представлены на рис. 2, б.

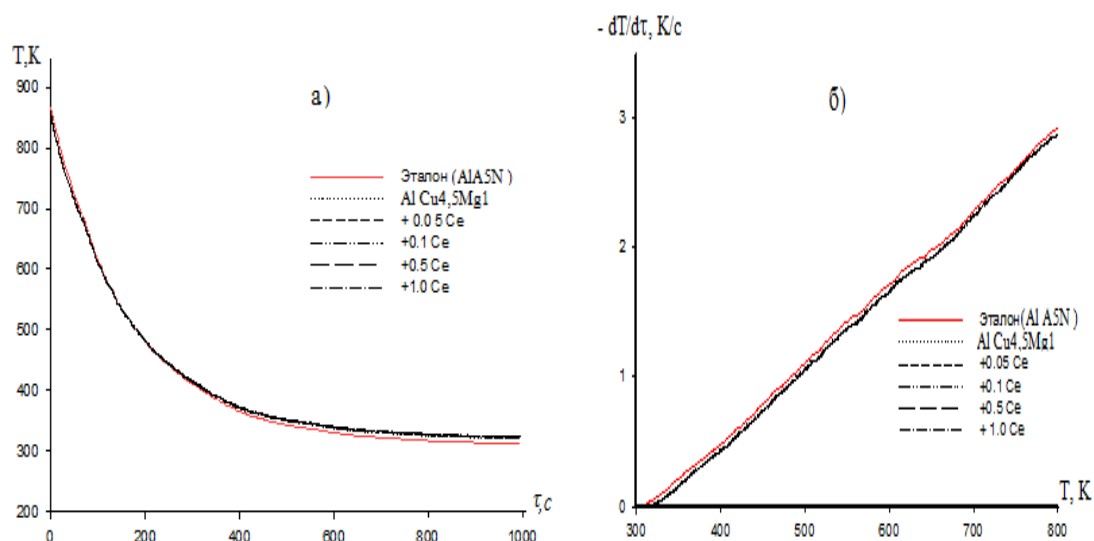


Рис. 2. Зависимости температуры от времени охлаждения (а) и скорости охлаждения от температуры (б) для эталона (алюминий А5N) и образцов из алюминиевого сплава AlCu4,5Mg1 с церием
 Fig. 2. Temperature dependences on the cooling time (a) and the cooling rate on the temperature (б) for the reference (aluminum A5N) and samples of aluminum alloy AlCu4,5Mg1 with cerium

Путем обработки кривых скоростей охлаждения образцов установлены экспериментальные значения коэффициентов a, b, p, k, ab, pk в уравнения (4), которые приведены в табл. 1.

Удельную теплоемкость сплавов определяли по уравнению (2) с учетом скоростей охлаждения образцов из исследуемых сплавов. Температурная зависимость теплоемкости сплавов описывается общим уравнением вида

$$C_p^0 = a + bT + cT^2 + dT^3. \quad (5)$$

Значения коэффициентов a, b, c, d в уравнении (5) представлены в табл. 2.

Вычисленные значения C_p^0 для алюминиевого сплава AlCu4.5Mg1 с церием через 100 К представлены в табл. 3 и на рис. 3, а.

По приведенным данным видно, что в исследованном температурном интервале с ростом температуры теплоемкость алюминиевого сплава AlCu4.5Mg1 с церием растет, а с увеличением содержания церия уменьшается. Рассчитанные значения теплоемкости алюминия марки А5N хорошо согласуются с данными, представленными в справочниках [22, 23].

Используя вычисленные данные по теплоемкости алюминиевого сплава AlCu4.5Mg1 с церием и экспериментально полученные значения скорости охлаждения образцов, был рассчитан коэффициент теплоотдачи $\alpha(T)$ для алюминиевого сплава AlCu4.5Mg1 по следующей формуле:

Т а б л и ц а 1

Значения коэффициентов a, b, p, k, ab, pk в уравнении (4) для эталона (алюминий А5N) и алюминиевого сплава Al4,5Cu1Mg с церием

Table 1. The values of the coefficients a, b, p, k, ab, pk in equation (4) for the reference (aluminum A5N) and aluminum alloy Al4,5C1MD with cerium

Содержание церия в сплаве, % (по массе)	a, K	$b \cdot 10^{-3}, c^{-1}$	p, K	$k \cdot 10^{-5}, c^{-1}$	$ab, K \cdot c^{-1}$	$pk \cdot 10^{-3}, K \cdot c^{-1}$
0	517,45	6,13	332,88	4,20	3,17	1,40
0,05	517,45	6,13	333,68	4,19	3,17	1,40
0,10	517,45	6,13	334,68	4,17	3,17	1,40
0,50	517,45	6,13	334,78	4,17	3,17	1,40
1,00	517,45	6,13	335,78	4,16	3,17	1,40
Эталон	540,10	6,12	315,20	5,61	3,30	1,77

Значения коэффициентов a, b, c, d в уравнении (5) для эталона (алюминий А5N) и
алюминиевого сплава AlCu4.5Mg1 с церием

Table 2. The values of the coefficients a, b, c, d in equation (5) for the reference (aluminum A5N) and
aluminum alloy AlSu4.5Mg1 with cerium

Содержание церия в сплаве, % (по массе)	a , Дж/(кг·К)	b , Дж/(кг·К ²)	$c \cdot 10^{-2}$, Дж/(кг·К ³)	$d \cdot 10^{-7}$, Дж/(кг·К ⁴)	Коэффициент корреляции R^2
0	676,60	0,97	1,22	8,69	0,9998
0,05	677,86	0,96	1,21	8,66	0,9998
0,10	679,15	0,95	1,20	8,63	0,9998
0,50	678,31	0,94	1,16	8,36	0,9998
1,00	680,42	0,90	1,11	8,12	0,9998
Эталон	690,34	1,01	1,27	9,13	1,00

$$\alpha = \frac{C_p^0 m \frac{dT}{d\tau}}{(T - T_0)S}, \quad (6)$$

где S – площадь поверхности образца, м².

Для алюминиевого сплава AlCu4.5Mg1 с церием температурная зависимость коэффициента теплоотдачи представлена на рис. 3, б. Видно, что с ростом температуры коэффициент теплоотдачи увеличивается, а с увеличением содержания церия – уменьшается.

Для расчета изменений энтальпии, энтропии и энергии Гиббса по формулам (7) – (9) для алюминиевого сплава AlCu4.5Mg1 с церием были использованы интегралы от удельной теплоемкости по уравнению (5):

$$[H^0(T) - H^0(T_0)] = a(T - T_0) + \frac{b}{2}(T^2 - T_0^2) + \frac{c}{3}(T - T_0^3) + \frac{d}{4}(T^4 - T_0^4); \quad (7)$$

$$[S^0(T) - S^0(T_0)] = a \ln \frac{T}{T_0} + b(T - T_0) + \frac{c}{2}(T^2 - T_0^2) + \frac{d}{3}(T^3 - T_0^3); \quad (8)$$

$$[G^0(T) - G^0(T_0)] = [H^0(T) - H^0(T_0)] - T[S^0(T) - S^0(T_0)], \quad (9)$$

где $T_0 = 298,15$ К.

Результаты расчета температурной зависимости изменений энтальпии, энтропии и энергии Гиббса для алюминиевого сплава AlCu4.5Mg1 с церием через 100 К представлены в табл. 4.

Энтальпия и энтропия сплавов при увеличении температуры растут, а с ростом содержания церия – уменьшаются. Энергии Гиббса имеет обратную зависимость. Увеличение содержания церия уменьшает энтальпию и энтропию и увеличивает энергию Гиббса сплава AlCu4.5Mg1.

Значения удельной теплоемкости алюминиевого сплава AlCu4.5Mg1 с церием
и эталона (алюминий А5N)

Table 3. Values of specific heat capacity of aluminum alloy AlSu4.5Mg1 with cerium
and reference (aluminum A5N)

Содержание церия в сплаве, % (по массе)	C_p^0 , Дж/(кг·К), при T , К					
	300	400	500	600	700	800
0	881,57	925,42	965,73	1007,70	1056,57	1117,53
0,05	881,26	924,90	965,13	1007,13	1056,12	1117,27
0,10	880,95	924,39	964,53	1006,56	1055,66	1117,01
0,50	878,50	922,22	962,81	1005,30	1054,66	1115,95
1,00	875,45	918,80	959,42	1002,22	1052,04	1113,77
Эталон	903,70	949,58	991,97	1036,35	1088,20	1153,00

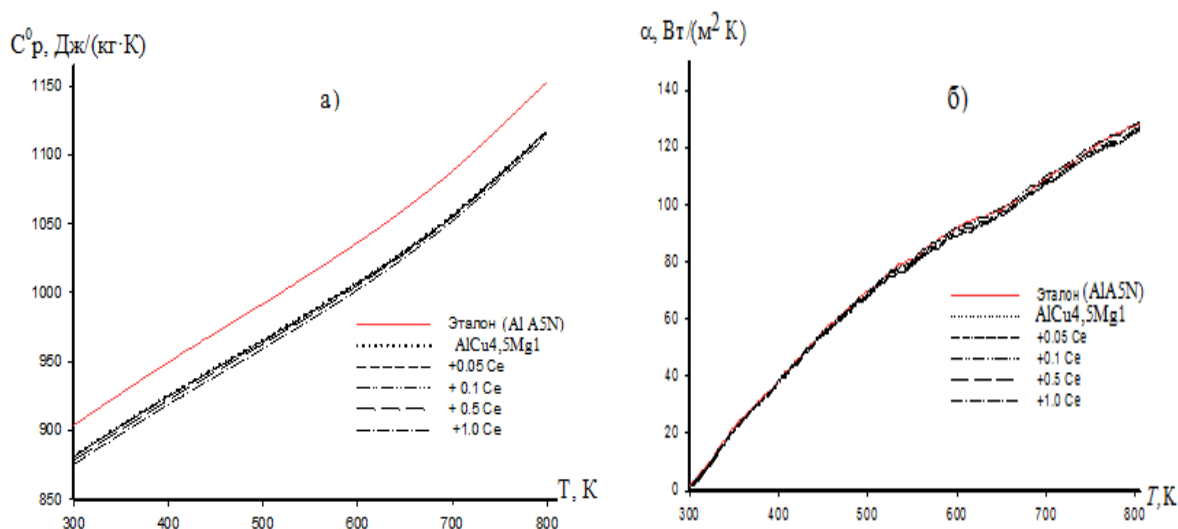


Рис. 3. Температурная зависимость удельной теплоемкости (а) и коэффициента теплоотдачи (б) алюминиевого сплава AlCu4.5Mg1 с церием и эталона (алюминий А5N)

Fig. 3. Temperature dependence of specific heat capacity (a) and heat transfer coefficient (b) of AlCu4.5Mg1 aluminum alloy with cerium and reference (Al A5N)

Выводы

В режиме «охлаждения» исследована температурная зависимость теплоемкости и коэффициента теплоотдачи алюминиевого сплава

AlCu4.5Mg1 с церием. Получены полиномы температурной зависимости теплоемкости и изменений термодинамических функций алюминиевого сплава AlCu4.5Mg1 с церием. Установ-

Т а б л и ц а 4

Температурная зависимость изменений термодинамических функций алюминиевого сплава Al Cu4.5Mg1 с церием и эталона (алюминий А5N)
Table 4. Temperature dependence of changes in thermodynamic functions of aluminum alloy Al Cu4.5Mg1 with cerium and standard (Al A5N)

Содержание церия в сплаве, % (по массе)	Значение функции при T , К					
	300	400	500	600	700	800
	$[H^0(T) - H^0(T_0^*)]$, кДж/кг					
0	1,630	92,030	186,596	285,232	388,367	496,950
0,05	1,629	91,985	186,492	285,067	388,148	496,692
0,10	1,628	91,945	186,396	284,914	387,945	496,455
0,50	1,624	91,696	185,944	284,303	387,212	495,613
1,00	1,618	91,338	185,206	283,196	385,765	493,861
Эталон	1,670	94,386	191,471	292,848	398,991	510,921
$[S^0(T) - S^0(T_0^*)]$, кДж/(кг·К)						
0	0,0054	0,2652	0,4760	0,6557	0,8146	0,9595
0,05	0,0054	0,2650	0,4758	0,6554	0,8142	0,9590
0,10	0,0054	0,2649	0,4755	0,6550	0,8137	0,9586
0,50	0,0054	0,2642	0,4744	0,6536	0,8122	0,9568
1,00	0,0054	0,2632	0,4725	0,6510	0,8090	0,9533
Эталон	0,0055	0,2719	0,4884	0,6731	0,8366	0,9860
$[G^0(T) - G^0(T_0^*)]$, кДж/кг						
0	-0,005	-14,055	-51,4364	-108,238	-181,902	-270,708
0,05	-0,005	-14,049	-51,4106	-108,181	-181,803	-270,561
0,10	-0,005	-14,043	-51,3872	-108,128	-181,712	-270,425
0,50	-0,005	-14,016	-51,2774	-107,901	-181,347	-269,906
1,00	-0,005	-13,950	-51,0510	-107,436	-180,581	-268,792
Эталон	-0,005	-14,412	-52,7590	-111,054	-186,69	-277,922

лено, что с ростом температуры теплоемкость, коэффициент теплоотдачи, энтальпия и энтропия сплавов увеличиваются, а с увеличением содержания церия – уменьшаются. Энергия Гиббса имеет обратную зависимость. Увеличение содержания церия уменьшает энтальпию и энтропию и увеличивает энергию Гиббса сплава AlCu4.5Mg1.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Альтман М.Б., Андереев А.Д., Балахонцев Г.А. и др. Плавка и литье алюминиевых сплавов. Москва: Металлургия, 1983. 351 с.
- Нильсен Х., Хуфнагель В., Ганулис Г. Алюминиевые сплавы (свойства, обработка, применение). Москва: Металлургия, 1979. 678 с.
- Луц А.Р., Суслина А.А. Алюминий и его сплавы. Самара: Самарский гос. тех. Университет, 2013. 81 с.
- Белецкий В.М., Кривов Г.А. Алюминиевые сплавы (состав, свойства, технология применение). Киев: «КОМИНТЕХ», 2005. 365 с.
- Промышленные алюминиевые сплавы / С.Г. Алиева, М.Б. Альтман, С.М. Амбарцумян и др. Москва: Металлургия, 1984. 527 с.
- Фридляндер И.Н. Высокопрочные деформируемые алюминиевые сплавы. Москва: Оборонгиз, 1960. 291 с.
- Shikun X., Rongxi Y., Zhi G., Xiang X., Chagen H., Xiuyan G. Effects of rare earth Ce on casting properties of Al-4.5Cu Alloy // *Advanced Materials Research*. 2010. Vol. 136. P. 1–4. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.136.1>
- Chaubey A.K., Mohapatra S., Jayasankar K., Pradhan S.K., Satpati B., Sahay S.S., Mishra B.K., Mukherjee P.S. Effect of cerium addition on microstructure and mechanical properties of Al-Zn-Mg-Cu alloy // *Transactions of The Indian Institute of Metals*. 2009. Vol. 62. No. 6. P. 539–543.
- Gröbner J., Mirkovic D., Schmid-Fetzer R. Thermodynamic Aspects of the constitution, grain refining, and solidification enthalpies of Al-Ce-Si alloys // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2004. Vol. 35. P. 33–49.
- Игишева А.Л., Соболева Э.Г. Измерение удельной теплоемкости твердого тела методом монотонного охлаждения. В кн.: Современное состояние и проблемы естественных наук. Сб. трудов 2-й Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, г. Юрга, 4-5 июня 2015 г. Томск: ТПУ, 2015. С. 74–78.
- Киров С.А., Козлов А.В., Салецкий А.М., Харабадзе Д.Э. Измерение теплоемкости и теплоты плавления методом охлаждения. Москва: ООП Физический факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, 2022, 26 с.
- Тарсин А.В., Костерин К.С. Определение теплоемкости металлов методом охлаждения. Лабораторные занятия. Ухта: УГТУ, 2014. 98 с.
- Рогачев Н.М., Гусева С.И. Определение удельной теплоемкости твердых тел. Самара: СГАУ им. С.П. Королёва, 2012. 115 с.
- Бодряков В.Ю. О корреляции температурных зависимостей теплового расширения и теплоемкости вплоть до точки плавления тугоплавкого металла: молибден // *Теплофизика высоких температур*. 2014. Т. 52. № 6. С. 863–868. <https://doi.org/10.7868/S004036441404005X>
- Кокин С.М., Стояхин С.Г., Мухин С.В. Постановка лабораторной работы «Определение удельной теплоемкости металла методом охлаждения». В кн: Сборник научных трудов XXVII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Проблемы учебного физического эксперимента». Глазов: ГГПИ им. В.Г. Короленко, 2022. С. 49–51.
- Антонов Е.А., Соболев В.В. Определение удельной теплоемкости металлов методом охлаждения. Ижевск: ИГТУ им. М.Т. Калашникова, 2015. 24 с.
- Ростокин В.И. Исследование зависимости теплоемкости металлов от температуры // *Физическое образование в ВУЗах*. 2011. Т. 17. № 3. С. 54–65.
- Ганиев И.Н., Аминбекова М.С., Окилов Ш.Ш. Температурная зависимость теплоемкости и изменений термодинамических функций свинцово-сурьмяного сплава SSu_3 , легированного кадмием // *Материаловедение*. 2023. № 1. С. 3–8.
- Ганиев И.Н., Ширинов М.Ч., Олимов Н.С., Иброхимов Н.Ф. Модифицирующее влияние кальция, стронция и бария на температурную зависимость теплоемкости и изменений термодинамических функций алюминиевого сплава АК9 // *Вестник Саратовского государственного технического университета*. 2022. № 4. С. 67–78.
- Ганиев И.Н., Шоназаров Р.С., Элмурод А., Файзуллоев У.Н., Ходжаназаров Х.М. Влияние добавок стронция на теплоемкость и термодинамические функции алюминиевого сплава AlCu4.5Mg1 // *Вестник Казанского государственного технического уни-*

верситета им. А.Н. Туполева. 2022. № 3. С. 35–42.

21. Худойбердизода С.У., Ганиев И.Н., Эшов Б.Б., Отаджонов С.Э., Муллоева Н.М. Температурная зависимость теплоемкости и изменений термодинамических функций свинцово-сурьмяного сплава SSu_3 , легированного теллуром // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2022. № 4. С. 3–10.
 22. Зиновьев В.Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах. Москва: Металлургия, 1989. С. 384.
 23. Равдель А.А. Краткий справочник физико-химических величин. Москва: ТИД «АРИС», 2010. 240 с.
- REFERENCES**
1. Altman M.B., Andreev A.D., Balakhontsev G.A., et al. *Smelting and casting of aluminium alloys*. Moscow: Metallurgiya, 1983, 351 p. (In Russ.).
 2. Nielsen H., Hufnagel V., Ganoulis G. *Aluminum alloys (properties, processing, application)*. Moscow: Metallurgiya, 1979, 678 p. (In Russ.).
 3. Lutz A.R., Suslina A.A. *Aluminum and its alloys*. Samara: CamGTU, 2013, 81 p. (In Russ.).
 4. Beletsky V.M., Krivov G.A. *Aluminum alloys (composition, own, technology application)*. Kiev: «KOMINTEH», 2005. 365 p. (In Russ.).
 5. Aliyeva S.G., Altman M.B., Ambartsumyan S.M., et al. *Industrial aluminum alloys*. Moscow: Metallurgiya, 1984, 527 p. (In Russ.).
 6. Friedland I.N. *Aluminum alloys. Deformiruyemye splavy*. Moscow: Mashinostroenie, 1964, 408 p. (In Russ.).
 7. Shikun X., Rongxi Y., Zhi G., Xiang X., Chagen H., Xiuyan G. Effects of rare earth Ce on casting properties of Al-4.5Cu Alloy. *Advanced Materials Research*. 2010, vol. 136, pp. 1–4. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.136.1>
 8. Chaubey A.K., Mohapatra S., Jayasankar K., Pradhan S.K., Satpati B., Sahay S.S., Mishra B.K, Mukherjee P.S. Effect of cerium addition on microstructure and mechanical properties of Al-Zn-Mg-Cu alloy. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2009, vol. 62, no. 6, pp. 539–543.
 9. Gröbner J., Mirkovic D., Schmid-Fetzer R. Thermodynamic aspects of the constitution, grain refining, and solidification enthalpies of Al-Ce-Si alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2004, vol. 35, pp. 33–49.
 10. Igisheva A.L., Soboleva E.G. *Measurement of specific heat capacity of a solid by monotonous cooling*. In book: *Modern state and problems of natural sciences*. Tomsk: TPU, 2015, pp. 74–78. (In Russ.).
 11. Kirov S.A., Kozlov A.V., Saletsky A.M., Kharabadze D.E. *Measurement of heat capacity and heat of melting by cooling*. Moscow: OOP Fizicheskij fakul'teta MGU im. M.V. Lomonosova, 2022, 26 p. (In Russ.).
 12. Tarsin A.V., Kosterin K.S. *Determination of the heat capacity of metals by cooling. Laboratory classes*. Uhta: UGTU, 2014, 98 p. (In Russ.).
 13. Rogachev N.M., Guseva S.I. *Determination of specific heat capacity of solid bodies*. Samara: SGAU im. S.P. Korolyova, 2012, 115 p. (In Russ.).
 14. Bodryakov Yu.V. On correlation of temperature dependencies of thermal expansion and heat capacity up to melting point of refractory metal: molybdenum. *Teplofizika vysokih temperatur*. 2014, vol. 52, no. 6, pp. 863–868. <https://doi.org/10.7868/S004036441404005X>. (In Russ.).
 15. Kokin S.M., Stoyukhin S.G., Mukhin S.V. *Production of laboratory work "Determination of specific heat capacity of metal by cooling."* In: *Collection of scientific works of the XXVII All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation "Problems of educational physical experiment."* Glazov. 2022, pp. 49–51. (In Russ.).
 16. Antonov E.A., Sobolev V.V. *Determination of specific heat capacity of metals by cooling*. Izhevsk, 2015, 24 p. (In Russ.).
 17. Rostokin V.I. Study of the dependence of the heat capacity of metals on temperature. *Fizicheskoe obrazovanie v VUZah*. 2011, vol. 17, no. 3, 54–65 p. (In Russ.).
 18. Ganiev I.N., Aminbekova M.S., Okilov Sh.Sh. Temperature dependence of heat capacity and changes in thermodynamic functions of lead-antimony alloy SSu_3 doped with cadmium. *Materialovedenie*. 2023, no. 1, pp.3–8. (In Russ.).
 19. Ganiev I.N., Shirinov M.Ch., Olimov N.S., Ib-rokhimov N.F. Modificiruyemye influence of calcium, strontium and barium on temperature dependence of heat capacity and changes in thermodynamic functions of aluminum alloy AK9. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2022, no. 4, pp. 67–78. (In Russ.).
 20. Ganiev I.N., Shonazarov R.S., Elmurod A, Fayzullov U.N., Khojanazarov H.M. Influence of strontium additives on heat capacity and thermodynamic functions of aluminum alloy Al-Cu4.5Mg1. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im A.N. Tupoleva*. 2022, no.3, pp. 35–42. (In Russ.).
 21. Khudoiberdizoda S.U., Ganiev I.N., Eshov B.B., Otadzhonov S.E., Mulloeva N.M. Tem-

perature dependence of heat capacity and changes in the thermodynamic functions of the lead-antimony alloy of CCy3 doped with tellurium. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2022, no. 4, pp. 3–10. (In Russ.).

22. Zinoviev V.E. Thermophysical properties of metals at high temperatures. Moscow: Metallurgiya, 1989, pp. 384. (In Russ.).

23. Rawdel A.A. *Brief reference book of physical and chemical quantities*. Moscow: TID «ARIS», 2010, 240 p. (In Russ.).

Сведения об авторах

Изатулло Наврузович Ганиев, академик НАНТ, д.х.н., профессор, заведующий лабораторией, Институт химии В.И. Никитина Национальной академии наук Таджикистана

E-mail: ganiev48@mail.ru

ORCID: 0000-0002-2791-6508

Мунаваршо Мирзоалиевич Саидов, ассистент кафедры естественных наук и математики, Республиканский медицинский колледж

E-mail: saidov.m96@mail.ru

ORCID: 0009-0002-9231-6231

Убайдулло Нарзуллоевич Файзуллоев, к.т.н., старший преподаватель, Филиал Национального исследовательского технологического университета (НИТУ) «МИСиС»

Илхом Темур Амазонда, д.т.н., доцент кафедры технологии машиностроения, металлорежущих

станков и инструментов, Таджикский технический университет им. М.С. Осими

Information about the authors

Izatullo N. Ganiev, Academician at NAST, Dr. Sci. (Chemical), professor, head of the laboratory, V.I. Nikitin Institute of Chemistry of the National Academy of Sciences of Tajikistan

E-mail: ganiev48@mail.ru

ORCID: 0000-0002-2791-6508

Munavarsho Saidov, Assistant of the Department of Natural Sciences and Mathematics, Republican Medical College

E-mail: saidov.m96@mail.ru

ORCID: 0009-0002-9231-6231

Ubaidullo N. Fayzulloev, Ph.D., Art. Lecturer, Branch of the National Research Technological University (NUST) "MISIS"

Ilhom T. Amazonda, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Engineering technology, metal cutting machines and tools, Tajik Technical University named after M.S. Osimi

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 12.04.2023

После доработки 20.06.2023

Принята к публикации 27.06.2023

Received 12.04.2023

Revised 20.06.2023

Accepted 27.06.2023