

УДК 669.2:669.715

## Влияние кальция на удельную теплоемкость и изменение термодинамических функций алюминиевого проводникового сплава AlTi0.1

© 2023 г. И. Н. Ганиев<sup>1</sup>, Р. Дж. Файзуллоев<sup>2</sup>, Ф. Ш. Зокиров<sup>1</sup>, А. Г. Сафаров<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими,  
просп. Акад. Рахмоновых, д. 10, Душанбе, 734042, Республика Таджикистан*

<sup>2</sup> *Институт энергетики Таджикистана,  
ул. Н. Хусрава, д. 73, поселок Бохтариен, район Кушониен, Хатлонская обл., 733036,  
Республика Таджикистан*

<sup>3</sup> *Физико-технический институт им. С.У. Умарова  
Национальной академии наук Таджикистана,  
просп. Садриддина Айни, д. 299/1, Душанбе, 734063, Республика Таджикистан*

✉ Автор для переписки: [ganievizatullo48@gmail.com](mailto:ganievizatullo48@gmail.com)

**Аннотация.** Среди всех известных металлов, таких как серебро, золото, медь, алюминий по электропроводности занимает четвертое место. Электропроводность меди при 20 °С принимается за 100 % IACS, алюминия в отожженном состоянии она составляет 62 % IACS. Однако, если учесть удельный вес алюминия, то на единицу массы его проводимость в 2 раза больше, чем у меди. Из этого следует, насколько выгодно применение алюминия в качестве материала для проводников. При одинаковой проводимости (одна и та же длина) проводник из алюминия имеет площадь поперечного сечения на 60 % больше, чем медь. При этом его масса составляет всего 48 % массы меди. Из-за низкой механической прочности в ряде случаев в электротехнике использование в качестве проводника алюминия затруднено или просто невозможно. Легированием другими металлами алюминия можно повысить его механическую прочность, несмотря на заметное снижение электропроводности.

В статье представлены результаты исследования теплоемкости алюминиевого проводникового сплава AlTi0.1 (Al + 0, 1 % (мас.) Ti) с кальцием. Исследование проведено в режиме «охлаждения» с использованием в качестве эталона алюминия марки А5N (99,999 % Al). Получены полиномы, описывающие скорости охлаждения образцов из сплавов и эталона. По рассчитанным значениям скоростей охлаждения образцов из исследуемых сплавов сформированы уравнения, описывающие температурную зависимость термодинамических функций (энтальпия, энтропия, энергия Гиббса) сплавов путем интегрирования зависимостей их теплоемкостей.

Установлено, что термодинамические функции и теплоемкость сплавов с ростом температуры увеличиваются, а от концентрации кальция уменьшаются.

**Ключевые слова:** алюминиевый проводниковый сплав AlTi0.1, кальций, режим «охлаждения», теплоемкость, энтальпия, энтропия, энергия Гиббса

**Для цитирования:** Ганиев И.Н., Файзуллоев Р.Дж., Зокиров Ф.Ш., Сафаров А.Г. Влияние кальция на удельную теплоемкость и изменение термодинамических функций алюминиевого проводни-

© 2023 National University of Science and Technology MISIS.

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

кового сплава AlTi0.1. *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники.* 2023; 26(1): 76–84. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2023-1-76-84>

## Influence of calcium on specific heat capacity and changes in thermodynamic functions of aluminum conductor alloy AlTi0.1

I. N. Ganiev<sup>1</sup>✉, R. J. Faizulloev<sup>2</sup>, F. Sh. Zokirov<sup>1</sup>, A. G. Safarov<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Tajik Technical University named after academician M.S. Osimi,  
10 Academicians Radjabov's Ave., Dushanbe 734042, Republic of Tajikistan*

<sup>2</sup> *Institute of Energy of Tajikistan,  
73 N. Khusrava Str., Bokhtariyon, Kushanyan District, Khatlon Region 733036, Republic of Tajikistan*

<sup>3</sup> *S.U. Umarov Physical–Technical Institute, Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan,  
299/1 Sadriddin Ayni Ave., Dushanbe 734063, Republic of Tajikistan*

✉ *Corresponding author: ganievizatullo48@gmail.com*

**Abstract.** Aluminum in terms of electrical conductivity among all known metals ranks fourth after silver, copper and gold. The electrical conductivity of annealed aluminum is approximately 62% IACS of the electrical conductivity of annealed standard copper, which at 20 °C. is taken as 100% IACS. However, due to its low specific gravity, aluminum has a conductivity per unit mass 2 times greater than copper. This property of aluminum gives us an idea of the economic viability of using it as a material for conductors. With equal conductivity (the same length), the aluminum conductor has a cross-sectional area 60% larger than copper, and its mass is only 48% of the mass of copper. In most cases, in electrical engineering, the use of aluminum as a conductor is difficult, and often simply impossible due to its low mechanical strength. An increase in the mechanical strength of aluminum is possible due to the introduction of alloying additives, i.e. creating alloys. In such a case, the mechanical strength increases, causing a noticeable decrease in electrical conductivity. The heat capacity of the aluminum conductor alloy AlTi0.1 (Al + 0.1 wt.% Ti) with calcium in the “cooling” mode was determined from the known heat capacity of the standard aluminum sample. Equations are obtained that describe the cooling rates of specimens made from an aluminum conductor alloy AlTi0.1 with calcium and a reference. Based on the calculated values of the cooling rates of the samples, the equations for the temperature dependence of the heat capacities of the alloys and the standard were formed. The temperature dependences of changes in enthalpy, entropy, and Gibbs energy for the aluminum alloy AlTi0.1 with calcium are calculated by integrating the specific heat capacity. The heat capacity, enthalpy, and entropy of the AlTi0.1 alloy decrease with increasing calcium concentration, and increase with increasing temperature, while the value of the Gibbs energy has an inverse relationship.

**Keywords:** aluminum conductor alloy AlTi0.1, calcium, heat capacity, enthalpy, entropy, Gibbs energy

**For citation:** Ganiev I.N., Faizulloev R.J., Zokirov F.Sh., Safarov A.G. Influence of calcium on specific heat capacity and changes in thermodynamic functions of aluminum conductor alloy AlTi0.1. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronics Engineering.* 2023; 26(1): 76–84. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2023-1-76-84>

### Введение

В настоящее время на заводах Республики Таджикистан для изготовления изолированных силовых проводов линии электропередач используют преимущественно катанку алюминиевую АКЛП, изготовленную из сплавов марок А5Е и А7Е с овальностью диаметром 9–19 мм. Катан-

ка АКЛП производится на литейно–прокатных агрегатах в соответствии с ГОСТ 13843–78. Она имеет сравнительно низкое электросопротивление и прочность. Электросопротивление алюминиевой катанки равно 0,0282 Ом·мм<sup>2</sup>/м, что в 1,62 раза больше электросопротивления меди. Максимально возможная рабочая температура при этом не превышает 100 °С. Недостаток электропроводности

алюминия по сравнению с медными проводами обычно компенсируют увеличением токопроводящей жилы. Чтобы обеспечить надежную работу линий и исключить обрывы, такой прочности и термостойкости недостаточно. Поэтому современные исследования направлены на разработку способов упрочнения и улучшения термоустойчивости алюминиевой катанки [1].

Из-за низкой механической прочности использование алюминия в электротехнике в качестве проводника невозможно или затруднено. При температурах около 100 °С упрочненный холодной деформацией проводниковый алюминий значительно теряет свою прочность. Рост механической прочности алюминия можно обеспечить путем его легирования, т. е. созданием сплавов. В таком случае заметно снижается электропроводность, но растет механическая прочность [1].

Анализ влияния легирующих элементов, таких как Fe, Zr, Mn, Cr, Ti, Ca и Mg, на электропроводность и прочность алюминия показывает, что при легировании ими алюминия наблюдается рост твердости. Указанные элементы заметно отличаются по атомным диаметрам от алюминия. В связи с тем, что основным параметром проводникового материала является электропроводность, следует выбирать легирующие добавки исходя из их влияния на изменения электропроводности [2—6].

В настоящее время существует несколько теорий модифицирования. Применительно к алюминиевым сплавам нет единого мнения в решении данной проблемы [7, 8]. Это объясняется сложностью процесса модифицирования и его зависимостью от условий плавки и литья, а также влиянием неконтролируемых примесей и компонентов. Последние могут влиять на измельчение исходного зерна сплава. Вводимая в качестве модификатора добавка (в нашем случае титана) должна удовлетворять следующим требованиям: обладать достаточной устойчивостью в расплаве без изменения химического состава; температура плавления добавки (титана) должна быть выше температуры плавления алюминия; размерное и структурное соответствие кристаллических решеток модификатора и алюминия [9—13].

Цель работы — исследование влияния добавок кальция на температурные зависимости удельной теплоемкости и изменения термодинамических функций алюминиевого проводникового сплава AlTi0.1 (Al + 0,1 % (мас.) Ti).

### Экспериментальные результаты и их обсуждение

Сплавы для исследования были получены в шахтной лабораторной печи сопротивления типа СШОЛ (сопротивление шахтное опытное лабора-

торное) в интервале температур 800—850 °С из алюминия марки А5 (ГОСТ 110669–01), титана марки ТГ–90 (ГОСТ 19807–91) и кальция металлического марки КаМ–1 (ТУ48–40–215–72). Лигатура алюминия с 2 % (мас.) титана предварительно изготавливалась в вакуумной печи сопротивления типа СНВ 2.4.2/16. Из полученных далее сплавов в графитовую изложницу отливались цилиндрические образцы диаметром 16 мм и длиной 30 мм.

Алюминиевый проводниковый сплав AlTi0.1 с кальцием подвергался химическому анализу на содержание основных компонентов в Центральной заводской лаборатории алюминиевой компании ГУП «ТалКо». Содержание кальция в сплаве колебалось от 0,01 до 0,5 % (мас.). Состав полученных сплавов контролировался также взвешиванием образцов до и после сплавления. В дальнейшем исследованию подвергались сплавы, у которых разница в массе до и после сплавления не превышала 2 % (отн.).

Как известно из работ [14; 15, С. 52—60; 16—18], теплоемкость твердых тел в режиме «охлаждения» определяется по уравнению

$$C_{p_2}^0 = C_{p_1}^0 \frac{m_1 \left( \frac{dT}{dt} \right)_1}{m_2 \left( \frac{dT}{dt} \right)_2}, \quad (1)$$

где  $m_1 = \rho_1 V_1$  — масса эталона;  $m_2 = \rho_2 V_2$  — масса исследуемого образца;  $(dT/dt)_1$ ,  $(dT/dt)_2$  — скорости охлаждения эталона и образцов из сплавов при данной температуре соответственно.

Для определения скорости охлаждения строят кривые охлаждения образцов.

Теплоемкость измерялась по методике, описанной в работах [19—23], на установке, схема которой представлена на рис. 1. Электродпечь 1 смонтирована на стойке 2, по которой она может перемещаться вверх и вниз (стрелка показывает направление перемещения). Образец 3 и эталон 4 (тоже могут перемещаться) представляют собой цилиндры длиной 30 мм и диаметром 16 мм с высверленными каналами с одного конца, в которые вставлены термодпары 5. Концы термодпар подведены к цифровым термометрам Digital Multimeter DI9208L (6—8).

Электродпечь 1 запускается через лабораторный автотрансформатор (ЛАТР) 9, нужная температура устанавливается с помощью терморегулятора 10. По показаниям цифровых термометров 6, 7 и 8 фиксируется значение начальной температуры. Образец 3 и эталон 4 нагреваются в электродпечи 1 до нужной температуры, которая контролируется по показаниям цифровых термометров на компьютере 11. Образец и эталон одновременно извлекаются из электродпечи, и с этого момента фикс-

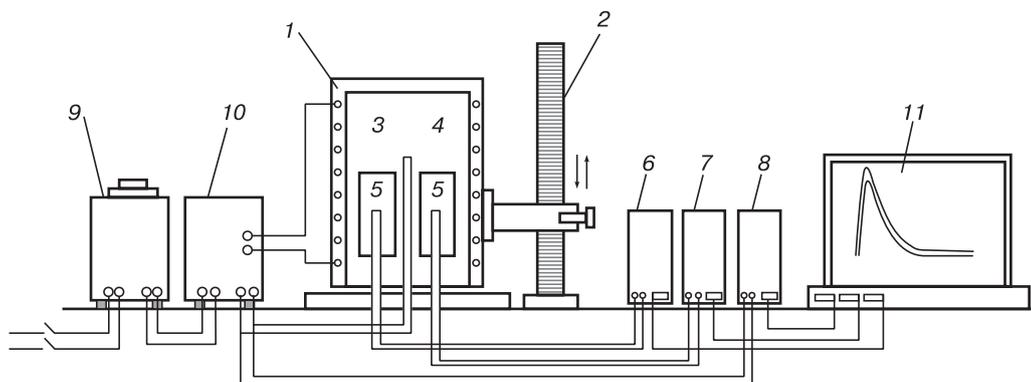


Рис. 1. Установка для определения теплоемкости твердых тел в режиме «охлаждения»  
 Fig. 1. Installation for determining the heat capacity of solid bodies in the “cooling” mode

сируется их температура. Показания цифровых термометров записываются на компьютер через каждые 10 с до охлаждения образца и эталона до комнатной температуры.

Обработка результатов измерений и построение графиков производились с помощью программ MS Excel и Sigma Plot. Коэффициент корреляции  $R_{\text{корр}} > 0,995$ , что подтверждает правильность выбора аппроксимирующей функции. Временной интервал фиксации температуры — 10 с. Относительная ошибка измерения теплоемкости в интервале от 40 до 400 °С составляла  $\pm 1\%$ , а выше 400 °С —  $\pm 2,5\%$  [24—26].

Полученные кривые охлаждения образцов из сплавов описываются уравнением вида

$$T = ae^{-bt} + pe^{-kt}, \quad (2)$$

где  $a, b, p, k$  — постоянные для данного образца;  $\tau$  — время охлаждения.

Результаты исследования температуры охлаждения изучаемых сплавов представлены на рис. 2, а. В общем случае полученные графи-

ки температуры ( $T$ ) от времени охлаждения ( $\tau$ ) для образцов из алюминиевого сплава AlTi0.1 с кальцием показывают непрерывное уменьшение температуры образцов и эталона по мере их охлаждения. На кривых охлаждения термических эффектов, связанных с фазовым превращением, не обнаружено.

Дифференцируя уравнение (2) по  $\tau$ , получаем уравнение для скорости охлаждения образцов

$$\frac{dT}{d\tau} = -abe^{-b\tau} - pke^{-k\tau}. \quad (3)$$

По формуле (3) вычислены скорости охлаждения образцов из сплава AlTi0.1 с кальцием и эталона. Кривые скорости охлаждения образцов представлены на рис. 2, б. Обработкой данных о скорости охлаждения получены значения коэффициентов  $a, b, p, k, ab, pk$  в (3), которые приведены в табл. 1.

С использованием данных о скорости охлаждения образцов по уравнению (1) вычислена удельная теплоемкость алюминиевого сплава AlTi0.1 с кальцием и эталона. Результаты через 100 К

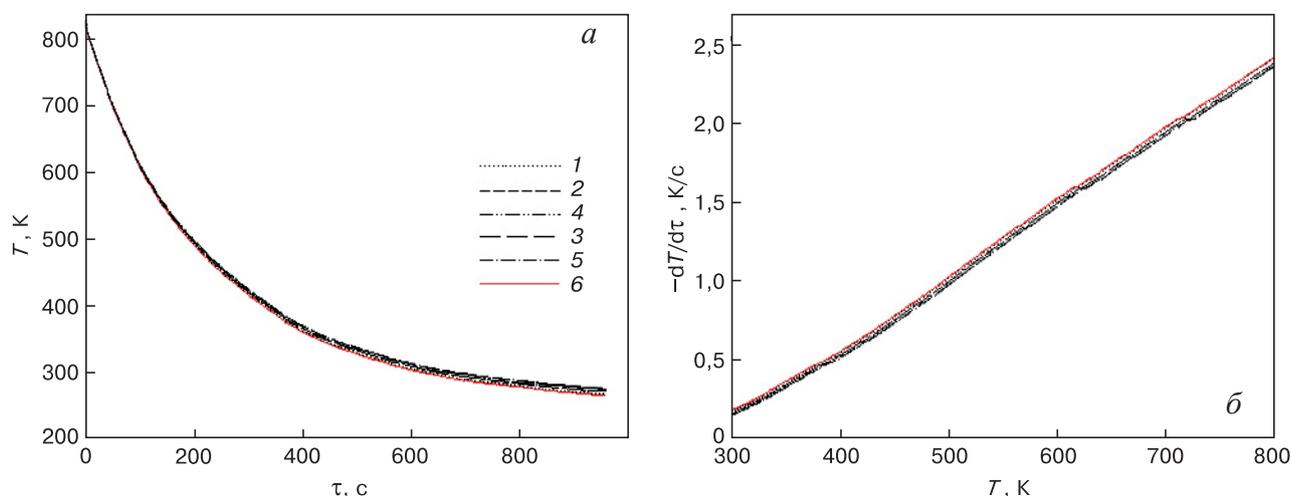


Рис. 2. График зависимости температуры от времени охлаждения (а) и скорость охлаждения от температуры (б) для образцов из алюминиевого сплава AlTi0.1 (1) с кальцием, % (мас.): 2 — 0,01; 3 — 0,05; 4 — 0,1; 5 — 0,5; 6 — эталон (Al A5N)  
 Fig. 2. Graph of dependence of temperature on cooling time (a) and cooling rate on temperature (б) for samples of aluminum alloy AlTi0.1 (1) with calcium, wt.%: 0.01 (2); 0.05 (3); 0.1 (4); 0.5 (5) and standard (Al A5N) (6)

Таблица 1 / Table 1

**Значения коэффициентов  $a, b, p, k, ab, pk$  в уравнении (3) для алюминиевого проводникового сплава AlTi0.1 с кальцием и эталона (Al A5N)**  
 Values of the coefficients  $a, b, p, k, ab, pk$  in equation (3) for the aluminum conductor alloy AlTi0.1 with calcium and the standard (Al A5N)

Содержание кальция в сплаве, % (мас.)	$a, K$	$b, 10^{-3} c^{-1}$	$p, K$	$k, 10^{-4} c^{-1}$	$ab, K/c$	$pk, 10^{-2} K/c$
0	495,45	4,94	321,62	2,24	2,45	7,20
0,01	491,78	4,91	323,29	2,15	2,42	6,94
0,05	491,78	4,91	323,19	2,15	2,42	6,94
0,1	490,02	4,90	326,37	2,08	2,40	6,79
0,5	490,02	4,90	326,18	2,08	2,40	6,79
Эталон	495,26	4,94	319,82	2,26	2,45	7,24

Таблица 2 / Table 2

**Зависимость удельной теплоемкости алюминиевого проводникового сплава AlTi0.1 с кальцием и эталона (Al A5N) от температуры**  
 Dependence of the specific heat capacity of the aluminum conductor alloy AlTi0.1 with calcium and the standard (Al A5N) on temperature

Содержание кальция в сплаве, % (мас.)	Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К)					
	300 К	400 К	500 К	600 К	700 К	800 К
0	903,33	949,02	991,11	1035,04	1086,25	1150,21
0,01	903,30	946,59	986,48	1028,41	1077,83	1140,18
0,05	903,199	946,49	986,38	1028,31	1077,73	1140,08
0,1	903,07	946,37	986,25	1028,18	1077,59	1139,95
0,5	902,04	945,07	984,63	1026,18	1075,14	1136,96
Эталон	903,70	949,58	991,97	1036,35	1088,21	1153,00

Таблица 3 / Table 3

**Значения коэффициентов  $a, b, c, d$  в уравнении (4) для алюминиевого проводникового сплава AlTi0.1 с кальцием и эталона (Al A5N)**  
 Values of the coefficients  $a, b, c, d$  in equation (4) for the aluminum conductor alloy AlTi0.1 with calcium and the standard (Al A5N)

Содержание кальция в сплаве, % (мас.)	$a, Дж/(кг·К)$	$b, Дж/(кг·К^2)$	$c, 10^{-4} Дж/(кг·К^3)$	$d, 10^{-7} Дж/(кг·К^4)$	Коэффициент корреляции $R$
0	690,11	1,010	-12,7	9,08	0,9999
0,01	698,48	0,980	-12,6	9,08	0,9998
0,05	698,38	0,980	-12,6	9,08	0,9998
0,1	698,25	0,980	-12,6	9,08	0,9998
0,5	697,88	0,978	-12,6	9,06	0,9998
Эталон	690,35	1,010	-12,7	9,13	1,0

представлены в табл. 2. Теплоемкость алюминиевого сплава AlTi0.1 с ростом температуры увеличивается, а от концентрации кальция уменьшается. Полученные значения теплоемкости для чистого

алюминия (эталона) совпадают с данными приведенными в справочнике [27].

После проведения полиномиальной регрессии получено следующее общее уравнение для описания

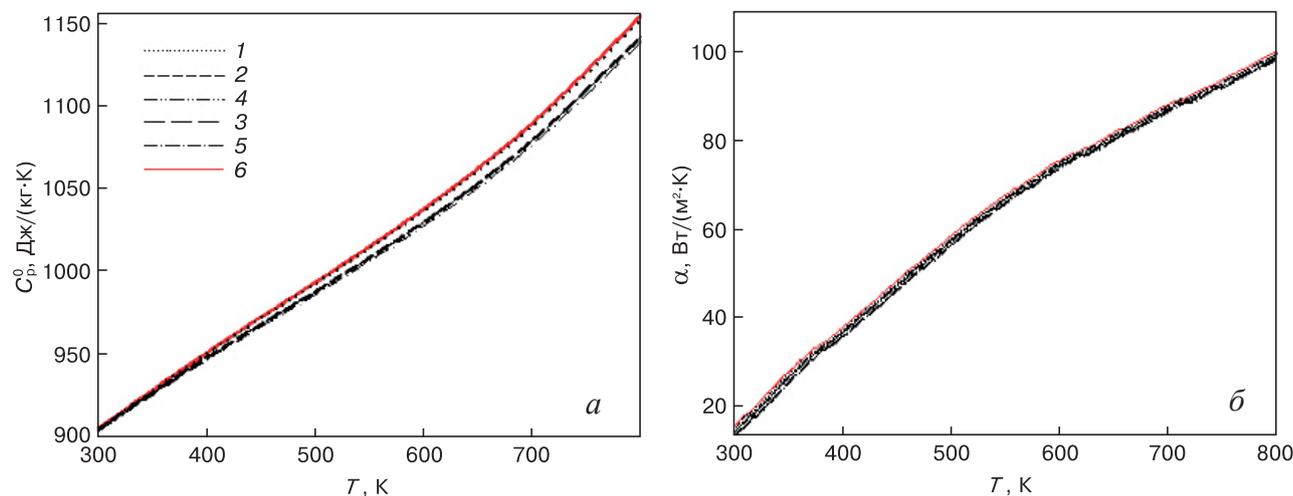


Рис. 3. Температурная зависимость теплоемкости (а) и коэффициента теплоотдачи (б) алюминиевого проводникового сплава AlTi0.1 (1) с кальцием, % (мас.): 2 — 0,01; 3 — 0,05; 4 — 0,1; 5 — 0,5; 6 — эталон (Al A5N)

Fig. 3. Temperature dependence of the heat capacity (a) and heat transfer coefficient (б) of the aluminum conductor alloy AlTi0.1 (1) with calcium, wt.%.: 0.01 (2); 0.05 (3); 0.1 (4); 0.5 (5) and standard (Al A5N) (6)

Таблица 4 / Table 4

**Температурная зависимость изменений энтальпии, энтропии и энергии Гиббса для алюминиевого проводникового сплава AlTi0.1 с кальцием и эталона (Al A5N)**

Temperature dependence of changes in enthalpy, entropy, and Gibbs energy for the aluminum conductor alloy AlTi0.1 with calcium and the standard (Al A5N)

Содержание кальция в сплаве, % (мас.)	Термодинамические функции					
	300 К	400 К	500 К	600 К	700 К	800 К
[ $H^0(T) - H^0(T_0^*)$ ], кДж/кг для сплавов						
0	1,6703	94,3405	191,3547	292,6241	398,6054	510,2997
0,01	1,6703	94,2163	190,8762	291,5814	396,8085	507,5785
0,05	1,6701	94,2059	190,8555	291,5505	396,7673	507,5271
0,1	1,6698	94,1928	190,8296	291,5118	396,7158	507,4628
0,5	1,6679	94,0751	190,5663	291,0678	396,0494	506,5245
Эталон (Al A5N)	1,6709	94,3869	191,4710	292,8481	398,9913	510,9213
[ $S^0(T) - S^0(T_0^*)$ ], кДж/(кг·К) для сплавов						
0	0,0056	0,2719	0,4881	0,6726	0,8359	0,9850
0,01	0,0056	0,2716	0,4870	0,6705	0,8326	0,9804
0,05	0,0056	0,2715	0,4869	0,6704	0,8325	0,9803
0,1	0,0056	0,2714	0,4869	0,6704	0,8324	0,9802
0,5	0,0056	0,2711	0,4862	0,6694	0,8311	0,9785
Эталон (Al A5N)	0,0056	0,2719	0,4884	0,6731	0,8367	0,9860
[ $G^0(T) - G^0(T_0^*)$ ], кДж/кг для сплавов						
0	-0,0052	-14,406	-52,732	-110,988	-186,565	-277,708
0,01	-0,0052	-14,394	-52,649	-110,744	-186,048	-276,800
0,05	-0,0052	-14,392	-52,643	-110,732	-186,028	-276,771
0,1	-0,0052	-14,390	-52,636	-110,717	-186,003	-276,734
0,5	-0,0052	-14,373	-52,568	-110,567	-185,738	-276,317
Эталон (Al A5N)	-0,0052	-14,412	-52,759	-111,054	-186,690	-277,922
* $T_0 = 298,15$ К.						

температурной зависимости удельной теплоемкости алюминиевого сплава AlTi0.1 с кальцием:

$$C_p^0 = a + bT + cT^2 + dT^3. \quad (4)$$

Значения коэффициентов  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  в уравнении (3) представлены в табл. 3.

С использованием значений удельной теплоемкости и скоростей охлаждения образцов вычислен коэффициент теплоотдачи алюминиевого сплава AlTi0.1 с кальцием ( $\alpha$ ) по уравнению

$$\alpha_T = \frac{C_p^0 m \frac{dT}{dT_0}}{(T - T_0)S}, \quad (5)$$

где  $T$ ,  $T_0$  — температуры образца и окружающей среды, соответственно;  $S$ ,  $m$  — площадь поверхности и масса образца соответственно.

Температурные зависимости теплоемкости и коэффициента теплоотдачи для алюминиевого сплава AlTi0.1 с кальцием представлены на рис. 3. Из рис. 3 видно, что добавки кальция несколько уменьшают коэффициент теплоотдачи исходного сплава AlTi0.1.

Для расчета температурной зависимости изменений энтальпии, энтропии и энергии Гиббса использовано уравнение (4):

$$\begin{aligned} [H^0(T) - H^0(T_0)] &= a(T - T_0) + \frac{b}{2}(T^2 - T_0^2) + \\ &+ \frac{c}{3}(T^3 - T_0^3) + \frac{d}{4}(T^4 - T_0^4), \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} [S^0(T) - S^0(T_0)] &= a \ln \frac{T}{T_0} + b(T - T_0) + \\ &+ \frac{c}{2}(T^2 - T_0^2) + \frac{d}{3}(T^3 - T_0^3), \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} [G^0(T) - G^0(T_0)] &= \\ &= [H^0(T) - H^0(T_0)] - T[S^0(T) - S^0(T_0)], \end{aligned} \quad (8)$$

где  $T_0 = 298,15$  К.

Результаты расчета температурных зависимостей изменений энтальпии, энтропии и энергии Гиббса по (6) — (8) для алюминиевого сплава AlTi0.1 с кальцием представлены в табл. 4.

### Заключение

Исследованием температурной зависимости теплоемкости алюминиевого проводникового сплава AlTi0.1 с кальцием установлено, что с ростом температуры теплоемкость, энтальпия, энтропия сплавов растут, а по мере увеличения концентрации кальция в сплаве — уменьшаются. Энергия Гиббса с ростом температуры уменьшается, а от концентрации кальция — увеличивается.

### Библиографический список

1. Захаров М.В., Лисовская Т.Д. Влияние различных элементов на электропроводность, твердость и температуру рекристаллизации алюминия марки АВ000. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 1965; (3): 51—55.
2. Мальцев М.В. Модифицирование структуры металлов и сплавов. М.: Металлургия; 1984. 282 с.
3. Zhang L., Palm M., Stein F., Sauthoff G. Formation of lamellar microstructures Al-rich TiAl alloys between 900 to 1100 °C. *Intermetallics*. 2001; 9(3): 229—238. [https://doi.org/10.1016/S0966-9795\(00\)00125-4](https://doi.org/10.1016/S0966-9795(00)00125-4)
4. Palm M., Zhang L.S., Stein F., Sauthoff G. Phases and phase equilibria in the Al-rich part of the Al-Ti system above 900 °C. *Intermetallics*. 2002; 10(6): 523—540. [https://doi.org/10.1016/S0966-9795\(02\)00022-5](https://doi.org/10.1016/S0966-9795(02)00022-5)
5. Nakano T., Negishi A., Hayashi K., Umakoshi Y. Ordering process of Al<sub>5</sub>Ti<sub>3</sub>, h-Al<sub>2</sub>Ti and r-Al<sub>2</sub>Ti with FCC-based long-period superstructures in rapidly solidified Al-rich TiAl alloys. *Acta Materialia*. 1999; 47(4): 1091—1104. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(99\)00009-9](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(99)00009-9)
6. Witusiewicz V.T., Bondar A.A., Hecht U., Rex S., Velikanova T.Ya. The Al-B-Nb-Ti system. III. Thermodynamic re-evaluation of the constituent binary system Al-Ti. *Journal of Alloys and Compounds*. 2008; 465(1-2): 64—77. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2007.10.061>
7. Куцова В.З., Погребна Н.С. Хохлова Т.С. Алюміній та сплави на його основі. Дніпропетровськ: Пороги; 2004. 135 с.
8. Оно А. Затвердевание металлов. Пер с англ. М.: Металлургия; 1980. 152 с.
9. Benci J.E., Ma J.C., Feist T.P. Evaluation of the intermetallic compound Al<sub>2</sub>Ti for elevated-temperature applications. *Materials Science and Engineering: A*. 1995; 192-193(Pt 1): 38—44. [https://doi.org/10.1016/0921-5093\(94\)03201-7](https://doi.org/10.1016/0921-5093(94)03201-7)
10. Wu Z.L., Pope D.P. L<sub>12</sub>Al<sub>3</sub>Ti-based alloys with Al<sub>2</sub>Ti precipitates - I. Structure and stability of the precipitates. *Acta Metallurgica et Materialia*. 1994; 42(2): 509—518. [https://doi.org/10.1016/0956-7151\(94\)90505-3](https://doi.org/10.1016/0956-7151(94)90505-3)
11. Wu Z.L., Pope D.P. L<sub>12</sub>Al<sub>3</sub>Ti-based alloys with Al<sub>2</sub>Ti precipitates - II. Deformation behavior of single crystals. *Acta Metallurgica et Materialia*. 1994; 42(2): 519—526. [https://doi.org/10.1016/0956-7151\(94\)90506-1](https://doi.org/10.1016/0956-7151(94)90506-1)
12. Sturm D., Heilmaier M., Saage H., Paninski M., Schmitz G.J., Drevermann A., Palm M., Stein F., Engberding N., Kelm K., Irsen S. Creep strength of centrifugally cast Al-rich TiAl alloys. *Materials Science and Engineering: A*. 2009; 510-511: 373—376. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2008.01.102>
13. Деменок А.О., Ганеев А.А., Деменок О.Б., Кулаков Б.А. Выбор легирующих элементов для сплавов на основе алюминидов титана. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия*. 2013; 13(1): 95—102. <https://vestnik.susu.ru/metallurgy/article/viewFile/1544/1501>; <https://elibrary.ru/qbjhcj>
14. Киров С.А., Козлов А.В., Салецкий А.М., Харбадзе Д.Э. Измерение теплоемкости и теплоты плавления методом охлаждения. М.: ООП Физ. фак-та МГУ; 2012. 23 с. [http://genphys.phys.msu.ru/rus/lab/school/Lab210sch\\_2017-03-08.pdf](http://genphys.phys.msu.ru/rus/lab/school/Lab210sch_2017-03-08.pdf)
15. Булкин П.С., Попова И.И. Общий физический практикум. Молекулярная физика. Под ред. А.Н. Матвеева, Д.Ф. Киселева. М.: Изд-во МГУ; 1988. 215 с.

16. Матвеев А.Н. Молекулярная физика. М.: Бином. Лаборатория знаний; 2010. 368 с.

17. Сивухин Д.В. Общий курс физики. В 5 т. Т. 2. Термодинамика и молекулярная физика. М.: Физматлит; 2005. 544 с.

18. Кикоин И.К., Кикоин А.К. Молекулярная физика. СПб.: Лань; 2008. 484 с.

19. Ганиев И.Н., Муллоева Н.М., Низомов З., Обидов Ф.У. Температурная зависимость теплоемкости и термодинамических функций сплавов системы Pb–Ca. *Теплофизика высоких температур*. 2014; 52(1): 138—140. <https://doi.org/10.7868/S0040364414010098>

20. Зокиров Ф.Ш., Ганиев И.Н., Сангов М.М., Иброхимов Н.Ф. Влияние кальция на температурную зависимость теплоемкости и изменчивость термодинамической функции сплава АК12М2. *Теплофизика высоких температур*. 2018; 56(6): 867—872. <https://doi.org/10.1134/S0018151X18060093>

21. Ганиев И.Н., Отаджонов С.Э., Иброхимов Н.Ф., Махмудов М. Температурная зависимость теплоемкости и изменений термодинамических функций сплава АК1, легированного стронцием. *Теплофизика высоких температур*. 2019; 57(1): 22—26. <https://doi.org/10.1134/S0040364419010095>

22. Ганиев И.Н., Сафаров А.Г., Одинаев Ф.Р., Якубов Ю.С., Кабутов К. Температурная зависимость те-

плоемкости и термодинамических функций сплавов Al + 4,5 % Fe, легированных оловом. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2019; (1): 50—58. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2019-1-50-58>

23. Ганиев И.Н., Отаджонов С.Э., Иброхимов Н.Ф., Махмудов М. Температурная зависимость теплоемкости и изменений термодинамических функций сплава АК1М2, легированного стронцием. *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники*. 2018; 21(1): 35—42. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2018-1-35-42>

24. Гордов А.Н., Парфенов В.Г., Потягайло А.Ю., Шарков А.В. Статистические методы обработки результатов теплофизического эксперимента. Под ред. А.Н. Гордова. Ленинград: ЛИТМО–Л; 1981. 72 с.

25. Геращенко О.А., Гордов А.Н., Лах В.И., Стадник Б.И. Температурные измерения. Киев: Наукова думка; 1984. 495 с.

26. Теория и техника теплофизического эксперимента. Под ред В.К. Щукина. М.: Энергоатомиздат; 1993. 448 с.

27. Зиновьев В.Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах. М.: Металлургия; 1984. 384 с.

## References

1. Zakharov M.V., Lisovskaya T.D. Influence of various elements on the electrical conductivity, hardness and recrystallization temperature of AB000 aluminum. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 1965; (3): 51—55. (In Russ.)

2. Maltsev M.V. Modification of the structure of metals and alloys. Moscow: Metallurgiya; 1984. 282 p. (In Russ.)

3. Zhang L., Palm M., Stein F., Sauthoff G. Formation of lamellar microstructures Al-rich TiAl alloys between 900 to 1100 °C. *Intermetallics*. 2001; 9(3): 229—238. [https://doi.org/10.1016/S0966-9795\(00\)00125-4](https://doi.org/10.1016/S0966-9795(00)00125-4)

4. Palm M., Zhang L.S., Stein F., Sauthoff G. Phases and phase equilibria in the Al-rich part of the Al–Ti system above 900 °C. *Intermetallics*. 2002; 10(6): 523—540. [https://doi.org/10.1016/S0966-9795\(02\)00022-5](https://doi.org/10.1016/S0966-9795(02)00022-5)

5. Nakano T., Negishi A., Hayashi K., Umakoshi Y. Ordering process of Al<sub>5</sub>Ti<sub>3</sub>, h–Al<sub>2</sub>Ti and r–Al<sub>2</sub>Ti with FCC-based long-period superstructures in rapidly solidified Al-rich TiAl alloys. *Acta Materialia*. 1999; 47(4): 1091—1104. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(99\)00009-9](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(99)00009-9)

6. Witusiewicz V.T., Bondar A.A., Hecht U., Rex S., Velikanova T.Ya. The Al–B–Nb–Ti system: III. Thermodynamic re-evaluation of the constituent binary system Al–Ti. *Journal of Alloys and Compounds*. 2008; 465(1–2): 64—77. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2007.10.061>

7. Kutsova V.Z., Pogrebna N.Y. Khokhlova T.S. Aluminum and alloys based on it. Dnipropetrovsk: Porogi; 2004. 135 p. (In Ukr.)

8. Ono A. Solidification of metals. Moscow: Metallurgy; 1980. 147 p. (Russ. transl.: Ono A. Zatverdevanie metallov. Moscow: Metallurgiya; 1980. 147 p.)

9. Benci J.E., Ma J.C., Feist T.P. Evaluation of the intermetallic compound Al<sub>2</sub>Ti for elevated-temperature applications. *Materials Science and Engineering: A*. 1995; 192–193(Pt 1): 38—44. [https://doi.org/10.1016/0921-5093\(94\)03201-7](https://doi.org/10.1016/0921-5093(94)03201-7)

10. Wu Z.L., Pope D.P. Li<sub>2</sub>Al<sub>3</sub>Ti-based alloys with Al<sub>2</sub>Ti precipitates – I. Structure and stability of the precipitates. *Acta Metallurgica et Materialia*. 1994; 42(2): 509—518. [https://doi.org/10.1016/0956-7151\(94\)90505-3](https://doi.org/10.1016/0956-7151(94)90505-3)

11. Wu Z.L., Pope D.P. Li<sub>2</sub>Al<sub>3</sub>Ti-based alloys with Al<sub>2</sub>Ti precipitates – II. Deformation behavior of single crystals. *Acta Metallurgica et Materialia*. 1994; 42(2): 519—526. [https://doi.org/10.1016/0956-7151\(94\)90506-1](https://doi.org/10.1016/0956-7151(94)90506-1)

12. Sturm D., Heilmaier M., Saage H., Paninski M., Schmitz G.J., Drevermann A., Palm M., Stein F., Engberding N., Kelm K., Irsen S. Creep strength of centrifugally cast Al-rich TiAl alloys. *Materials Science and Engineering: A*. 2009; 510–511: 373—376. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2008.01.102>

13. Demenok A.O., Ganeev A.A., Demenok O.B., Kulakov B.A. The choice of alloying elements for titanium aluminum base alloys. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Metallurgiya = Bulletin of the South Ural State University. Series 'Metallurgy*. 2013; 13(1): 95—102. (In Russ.). <https://vestnik.susu.ru/metallurgy/article/viewFile/1544/1501>; <https://elibrary.ru/qbjhcj>

14. Kirov S.A., Kozlov A.V., Saletsky A.M., Kharabadze D.E. Measurement of heat capacity and heat of melting by the method of cooling. Textbook. Moscow: EPT Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University; 2012. 23 p. (In Russ.)

15. Matveev A.N., Kiselev D.F., eds. Bulkin P.S., Popova I.I. General physical workshop. Molecular physics. Moscow: Publishing House of Moscow State University; 1988. 215 p. (In Russ.)

16. Matveev A.N. Molecular physics. Moscow: Binom. Laboratoriya znaniy; 2010. 368 p. (In Russ.)

17. Sivukhin D.V. General course of physics. In 5 vol. Vol. 2. Thermodynamics and molecular physics. Moscow: Fizmatlit; 2005. 544 p. (In Russ.)

18. Kikoin I.K., Kikoin A.K. Molecular physics. St. Petersburg: Lan'; 2008. 484 p. (In Russ.)

19. Ganiev I.N., Mulloeva N.M., Nizomov Z., Obidov F.U. Temperature dependence of the specific heat and thermodynamic functions of alloys of the Pb–Ca system. *Teplofizika vysokikh temperatur = High Temperature*. 2014; 52(1): 138–140. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0040364414010098>

20. Zokirov F.Sh., Ganiev I.N., Sangov M.M., Ibrokhirov N.F. Effect of calcium on the temperature dependence of the heat capacity and thermodynamic function variability of the AK12M2 alloy. *Teplofizika vysokikh temperatur = High Temperature*. 2018; 56(6): 867–872. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0018151X18060093>

21. Ganiev I.N., Otadzhonov S.E., Ibrokhirov N.F., Makhmudov M. Temperature dependence of the heat capacity and changes in the thermodynamic functions of the strontium alloyed AK1 alloy. *Teplofizika vysokikh temperatur = High Temperature*. 2019; 57(1): 22–26. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0040364419010095>

22. Ganiev I.N., Safarov A.G., Odinaev F.R., Yakubov U.S., Kabutov K. Temperature dependence of specific heat and thermodynamic functions of Al + 4,5 %

Fe alloys doped with tin. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2019; (1): 50–58. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2019-1-50-58>

23. Ganiev I.N., Otajonov S.E., Ibrohimov N.F., Makhmudov M. Temperature dependence of the specific heat and thermodynamic functions AK1M2 alloy, doped strontium. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Materialy Elektronnoi Tekhniki = Materials of Electronics Engineering*. 2018; 21(1): 35–42. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2018-1-35-42>

24. Gordov A.N., ed. Gordov A.N., Parfenov V.G., Potyagailo A.Yu. Statistical methods for processing the results of a thermophysical experiment. Leningrad: LITMO–L; 1981. 72 p. (In Russ.)

25. Gerashchenko O.A., Gordov A.N., Lakh V.I., Stadnyk B.I. Temperature measurements. Kiev: Naukova dumka; 1984. 495 p. (In Russ.)

26. Shchukin V.K., ed. Theory and technique of thermophysical experiment. Moscow: Energoatomizdat; 1993. 448 p. (In Russ.)

27. Zinov'ev V.E. Thermophysical properties of metals at high temperatures. Moscow: Metallurgiya; 1984. 384 p. (In Russ.)

### Информация об авторах / Information about the authors

**Ганиев Изатулло Наврузович** — доктор хим. наук, академик НАНТ, профессор кафедры технологии химических производств, Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, просп. Акад. Раджабовых, д. 10, Душанбе, 734042, Республика Таджикистан; <https://orcid.org/0000-0002-2791-6508>; e-mail: ganievizatullo48@gmail.com

**Файзуллоев Рустам Джалилович** — преподаватель кафедры энергетические системы и сети, Институт энергетики Таджикистана, ул. Н. Хусрава, д. 73, поселок Боктариен, район Кушониен, Хатлонская обл., 733036, Республика Таджикистан; e-mail: faizulloev\_r@mail.ru

**Зокиров Фуркатшох Шахриерович** — канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры физики, Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, просп. Акад. Раджабовых, д. 10, Душанбе, 734042, Республика Таджикистан; e-mail: Zokirov090514@mail.ru

**Сафаров Амиршо Гоибович** — доктор техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Физико-технический институт им. С.У. Умарова национальной академии наук Таджикистана, просп. Садриддина Айни, д. 299/1, Душанбе, 734063, Республика Таджикистан; e-mail: amirsho71@mail.ru

**Izatullo N. Ganiev** — Dr. Sci. (Chem.), Academician of the National Academy of Sciences of Tajikistan, Professor of the Department of Technology of Chemical Production, Tajik Technical University named after academician M.S. Osimi, 10 Academicians Radjabov's Ave., Dushanbe 734042, Republic of Tajikistan; <https://orcid.org/0000-0002-2791-6508>; e-mail: ganievizatullo48@gmail.com

**Rustam Dz. Fayzulloev** — Lecturer at the Department of Energy Systems and Networks, Institute of Energy of Tajikistan, 73 N. Khusrava Str., Bokhtariyon, Kushanyan District, Khatlon Region 733036, Republic of Tajikistan; e-mail: faizulloev\_r@mail.ru

**Furkatshokh Sh. Zokirov** — Ph.D. (Eng.), Lecturer of the Department of Physics, Tajik Technical University named after academician M.S. Osimi, 10 Academicians Radjabov's Ave., Dushanbe 734042, Republic of Tajikistan; e-mail: Zokirov090514@mail.ru

**Amirsho G. Safarov** — Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Leading Researcher, S.U. Umarov Physical–Technical Institute, Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan, 299/1 Sadrid-din Ayni Ave., Dushanbe 734063, Republic of Tajikistan; e-mail: amirsho71@mail.ru

Поступила в редакцию 30.03.2022; поступила после доработки 22.10.2022; принята к публикации 03.12.2022  
Received 30 March 2022; Revised 22 October 2022; Accepted 3 December 2022

\* \* \*