

ISSN 1999-4125 (Print)

ISSN 2949-0642 (Online)

МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ
METALLURGY AND HEAT TREATMENT OF METALS AND ALLOYS

Научная статья

УДК 669.017: 620.197

DOI: 10.26730/1999-4125-2026-4-89-97

ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК КРЕМНИЯ НА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ИЗМЕНЕНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АЛЮМИНИЯ МАРКИ А6

**Бексентова Гульмира Копшиловна, Сафаров Амиршо Гоибович,
Ганиев Изатулло Наврузович,
Валиев Джамшед**

Физико-технический институт им. С.У. Умарова Национальной академии наук Таджикистана

* для корреспонденции: amirsho71@mail.ru

**Информация о статье**

Поступила:

01 марта 2026 г.

Одобрена после

рецензирования:

01 сентября 2026 г.

Принята к публикации:

15 сентября 2026 г.

Ключевые слова:

алюминий марки А6, кремний, теплоемкость, режим «охлаждения», энтальпия, энтропия, энергия Гиббса

Аннотация.

В данной работе исследовано влияние легирующих добавок кремния на теплофизические свойства и термодинамические характеристики алюминия марки А6 в широком интервале температур 300–800 К. Экспериментальные исследования проводились в режиме контролируемого охлаждения, что позволило получить достоверные данные о температурной зависимости удельной теплоемкости сплавов с различным содержанием кремния. В качестве объектов исследования были выбраны сплавы алюминия с концентрацией Si 0,5; 0,8; 1,0 и 1,5 мас. %, что позволяет проследить закономерности изменения свойств в зависимости от степени легирования. Установлено, что добавки кремния оказывают заметное влияние на теплофизические параметры алюминия. В частности, с увеличением содержания кремния наблюдается изменение характера температурной зависимости удельной теплоемкости, что связано с модификацией структуры и межатомного взаимодействия в сплавах. Полученные экспериментальные данные были использованы для расчета основных термодинамических функций: энтальпии, энтропии и энергии Гиббса. Анализ результатов показал, что при увеличении концентрации кремния в исследуемом диапазоне происходит незначительное снижение значений энтальпии и энтропии, что может быть обусловлено упорядочением структуры и снижением степени теплового возбуждения системы. В то же время энергия Гиббса демонстрирует тенденцию к увеличению в ряду концентраций 0,5–0,8–1,0–1,5 мас. % Si, что свидетельствует об изменении термодинамической устойчивости сплавов и может быть связано с усилением межфазных взаимодействий. Полученные результаты имеют важное научное и практическое значение для понимания механизмов влияния легирующих элементов на свойства алюминиевых сплавов и могут быть использованы при разработке новых материалов с заданными теплофизическими и эксплуатационными характеристиками.

Для цитирования: Бексентова Г.К., Сафаров А.Г., Ганиев И.Н., Валиев Дж. Влияние добавок кремния на теплофизические свойства и изменение термодинамических характеристик алюминия марки А6 // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2026. № 4 (176). С. 89-97. DOI:

10.26730/1999-4125-2026-4-89-97, EDN: RNXYNT

Введение

Сегодня конструкционные материалы занимают достойное место во всех отраслях народного хозяйства. Среди таких материалов широко используют алюминиевые сплавы с различными добавками, прежде всего потому, что данные сплавы обладают уникальным сочетанием эксплуатационных характеристик при относительно низкой плотности по сравнению со сплавами на основе меди и стали [1, 2].

Диаграмма состояния Al-Si представляет собой диаграмму эвтектического вида. Авторы [3–5] указывают на образование в жидком расплаве Al-Si кластеров. Имеющиеся в литературных источниках данные по растворимости в твердых алюминиевых растворах кремния являются противоречивыми, так как указывается, что растворимость при 1327°C составляет 0.01% до 1.2% при $t=997^\circ\text{C}$. В основном принимают температуру эвтектики 577°C, при этом состав точки эвтектики определяется в диапазоне содержания Si 11.7–14.5% [4]; авторы [6–8] предлагают считать эту величину равной 12,5% кремния.

В алюминиевых твердых растворах с увеличением в них содержания кремния образуется эвтектическое соединение кремния в алюминии. Согласно [7], в сплавах Al с содержанием 11.7% Si происходит образование эвтектической смеси. Помимо присутствия эвтектической структуры в алюминиевом литье, получаемом при высоких давлениях, важное значение для указанных сплавов имеет их пластичность, которая проявляется при температурах ниже точки перехода алюминиевых сплавов в твердое состояние. Известным фактом является то, что при легировании сплавов значительно повышаются их механические характеристики. Известно также, что лучшие литейные характеристики имеют сплавы эвтектических составов, среди которых можно выделить силумины. Но при этом резервы улучшения сплавов на основе силуминов являются исчерпанными, а их эксплуатационные, а также физико-механические свойства в настоящее время часто не отвечают требованиям современной техники. Одним из недостатков силуминовых сплавов можно назвать их низкую пластичность, эти сплавы не могут выдерживать значительную ударную нагрузку, поэтому из указанных сплавов трудно получать комбинированные

детали, которые являются частично деформированными и частично литыми [9, 10].

Как известно, важными характеристиками, которые определяют закономерности поведения сплавов под воздействием внешних условий, являются их теплофизические и термодинамические характеристики. Поэтому в данной статье проводили исследования изменения величины теплоемкости и термодинамических характеристик для алюминия марки А6 с различным содержанием кремния.

Цель работы заключается в исследовании влияния добавок кремния на температурную зависимость удельной теплоемкости и изменений термодинамических функций алюминия марки А6.

Экспериментальная часть

Для исследования сплавов алюминия марки А6 с различным содержанием Si их получали в шахтной печи марки СШОЛ при температуре 850–950°C. Содержание кремния в алюминии марки А6 соответствует следующим соотношениям: 0,5; 0,8; 1,0 и 1,5 мас. %. Элементный состав получаемых сплавов определяли в лаборатории ГУП «ТалКо». Параллельно с этим элементный состав определялся путем предварительного взвешивания получаемой шихты и каждого из получаемых образцов сплавов в отдельности. При плавлении образцам придавалась форма цилиндров с диаметром, равным 16 мм, длиной 30 мм.

По известным методикам, описанным ранее в [11–12], определялась теплоемкость алюминия марки А6 с различным содержанием кремния. Принцип действия и конструкционная особенность установки для определения теплоемкости сплавов ранее были неоднократно описаны в работах [13–17], нет необходимости описывать ее (Рис. 1), поэтому ограничимся общим кратким описанием данной установки. Для сравнения в печь на двигающейся стойке устанавливаются образцы полученных нами сплавов и эталонный образец. К образцам подведены термодатчики, которые имеют также выход на цифровой термометр, фиксирующий начальную температуру образцов и эталона. После установки образца и эталона в печь цифровой термометр фиксирует начальную температуру, а затем увеличение температуры через каждые 10 секунд. Далее образец и эталон выдвигаем из печи, термометром фиксируется снижение температуры через каждые 10 секунд.

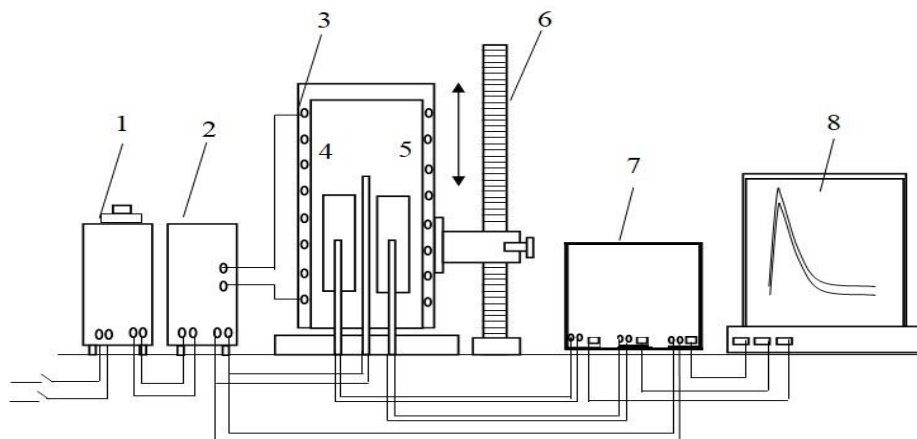


Рис. 1. Установка для определения теплоемкости твердых тел в режиме «охлаждения»: 1 – автотрансформатор; 2 – терморегулятор; 3 – электропечь; 4 – образец измеряемый; 5 – эталон 6 – стопка электропечи; 7 – цифровой термометр измеряемого образца; 8 – цифровой термометр общего назначения; 9 – цифровой термометр эталона; 10 – регистрационный прибор

Fig. 1. Apparatus for determining the heat capacity of solids in the "cooling" mode: 1 – autotransformer; 2 – thermostat; 3 – electric furnace; 4 – measured sample; 5 – standard; 6 – electric furnace stack; 7 – digital thermometer of the measured sample; 8 – digital general-purpose thermometer; 9 – digital standard thermometer; 10 – registration device

Таблица 1. Значения коэффициентов a , b , p , k , ab , pk из выражения (2) для сплава алюминия марки А6 с различным содержанием Si и эталонного образца (марки А5N)

Table 1. Values of the coefficients a , b , p , k , ab , pk from expression (2) for aluminum alloy grade A6 with different Si content and the reference sample (grade A5N)

Содержание Si в алюминии марки А6, мас. %	a, K	$b \cdot 10^{-3}, c^{-1}$	p, K	$k \cdot 10^{-4}, c^{-1}$	$ab, K \cdot c^{-1}$	$pk \cdot 10^{-2}, K \cdot c^{-1}$
А6	480,7571	4,58	335,0815	1,27	2,20	4,26
0,5	480,7416	4,58	333,5977	1,28	2,20	4,26
0,8	480,7259	4,58	332,1142	1,28	2,20	4,26
1,0	480,7048	4,58	330,1364	1,29	2,20	4,27
1,5	480,6898	4,58	328,7521	1,30	2,20	4,27
Эталон	473,0850	4,67	344,7507	1,55	2,21	5,35

Результаты данных измерений обрабатывались нами в программе «MS Excel». Все графики были построены в программе «Sigma Plot». Также был рассчитан коэффициент корреляции ($R_{кор.}$), величина которого находилась в пределах 1,0-0,998, что является подтверждением правильности выбора аппроксимирующей функции. Температура охлаждения фиксировалась каждые 10 секунд. В температурном диапазоне 40-400°C относительная ошибка была незначительной, составляя $\pm 1.0\%$, в диапазоне температур $>400^\circ$ ошибка была в пределах $\pm 2.5\%$. Для данной методики измерения теплоемкости была также рассчитана погрешность, величина которой была в пределах 4%, что показывает правильность выбранной методики.

В данной статье приводятся результаты исследования величины теплоемкости и термодинамических характеристик (энтальпии, энтропии, энергии Гиббса) для алюминия марки А6 с различным содержанием Si. Исследования проводились методом «охлаждения», в качестве эталона использовался эталонный алюминий (марки А5N).

Экспериментально были построены кривые линии охлаждения образцов сплава алюминия марки А6 с различным содержанием Si. Термограммам данных образцов ($T=f(\tau)$) соответствует следующее выражение:

$$T = ae^{-b\tau} + pe^{-k\tau}, \quad (1)$$

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

Затем для определения скорости охлаждения образцов сплавов уравнение (1) дифференцировали по времени (τ):

$$\frac{dT}{d\tau} = -abe^{-b\tau} - pke^{-k\tau} \quad (2)$$

Таким образом, для сплава алюминия марки А6 с различным содержанием Si (от 0.5 до 1.5 мас. % Si) получены полиномы (1) и (2), на основании их построены термограммы (Рис. 2а) и графики скоростей охлаждения для каждого из образцов (Рис. 2б). Процессы охлаждения для всех образцов достаточно близки друг к другу, и

температуры идентично уменьшаются. При охлаждении на кривых $T = f(\tau)$ для образцов из сплавов системы алюминий-кремний не обнаружены термические остановки, связанные с фазовым переходом или превращением. При обработке кривых охлаждения экспериментальные значения коэффициентов a , b , p , k , ab , pk определяются в уравнении (2), которое приведено в Таблице 1.

$$C_{p0}^0 = a + bT + cT^2 + dT^3$$

Затем для сплава

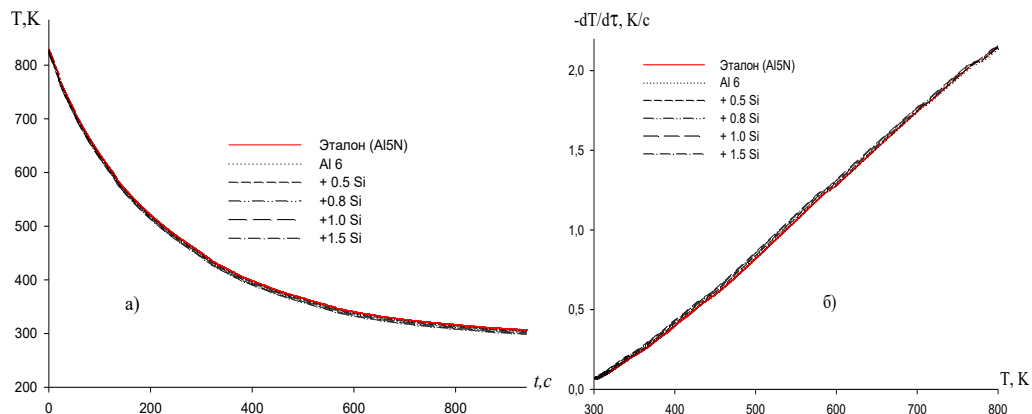


Рис. 2. График зависимости температуры от времени охлаждения (а) и скорости охлаждения от температуры (б) для образцов системы алюминий-кремний и эталона (Al марки А5N)

Fig. 2. Graph of the dependence of temperature on cooling time (a) and cooling rate on temperature (b) for samples of the aluminum-silicon system and the standard (Al grade A5N)

Таблица 2. Величины коэффициентов a , b , c , d из выражения (4) для сплава алюминия марки А6 с различным содержанием Si и эталонного алюминиевого образца (Al марки А5N)
Table 2. Values of the coefficients a , b , c , d from expression (4) for aluminum alloy grade A6 with different Si content and a reference aluminum sample (Al grade A5N)

Содержание Si в алюминии марки А6, мас. %	a , Дж/кг·К	b , Дж/кг·К ²	c , Дж/кг·К ³	$d \cdot 10^{-7}$, Дж/кг·К ⁴	Коэффициент корреляции R, %
Эталон	690,3491	1,0100	-0,00127	9,13	1,0
Al марки А6	688,6392	1,0113	-0,00127	9,14	0,999
0.5Si	686,3061	1,0200	-0,00128	9,16	0,998
0.8Si	685,5782	1,0250	-0,00129	9,19	0,998
1.0 Si	684,4395	1,0257	-0,00129	9,20	0,998
1.5Si	682,3311	1,0322	-0,00130	9,24	0,998

Таблица 3. Температурная зависимость удельной теплоемкости (Дж/(кг·К)) алюминия марки А6 с кремнием и эталона (Al марки А5N)
Table 3. Temperature dependence of the specific heat capacity (J/(kg K)) of aluminum grade A6 with silicon and the standard (Al grade A5N)

Содержание Si в алюминии марки А6, мас. %	300 K	400 K	500 K	600 K	700 K	800 K
Эталон	903,7001	949,5811	991,9741	1036,357	1088,208	1153,005
Al марки А6	902,4072	948,4552	991,0392	1035,643	1087,751	1152,847
0.5Si	901,8381	948,1301	990,8061	1035,362	1087,294	1152,098
0.8Si	901,7912	947,9942	990,4532	1034,682	1086,195	1150,506
1.0 Si	900,8895	947,1995	989,7895	1034,180	1085,890	1150,440
1.5Si	899,9391	946,3471	988,9311	1033,235	1084,803	1149,179

алюминия марки А6 с различным содержанием Si и эталонного образца (марки А5N) согласно уравнению (2) рассчитали значения скоростей их охлаждения. Определение удельной теплоемкости сплавов системы алюминий-кремний проводилось по следующей формуле:

$$C_{P1}^0 = C_{P2}^0 \cdot \frac{m_2}{m_1} \cdot \left(\frac{dT}{d\tau} \right)_2 / \left(\frac{dT}{d\tau} \right)_1, \quad (3)$$

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

Были получены полиномы температурной зависимости удельной теплоемкости сплавов системы алюминий-кремний и эталона (Al марки

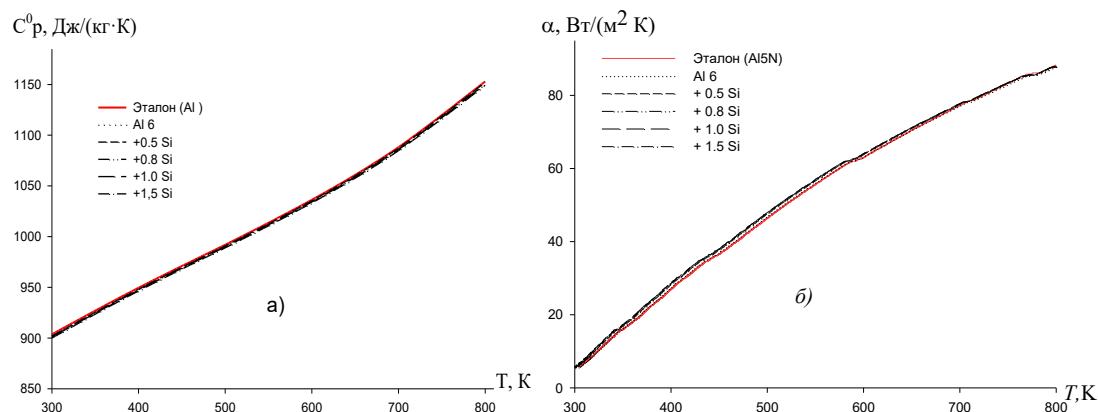


Рис. 3. Температурная зависимость удельной теплоемкости (а) и коэффициента теплоотдачи (б) алюминия марки А6 с различным содержанием Si и эталонного алюминиевого образца (Al марки А5N)

Fig. 3. Temperature dependence of the specific heat capacity (a) and heat transfer coefficient (b) of aluminum grade A6 with different Si content and a reference aluminum sample (Al grade A5N)

Таблица 4. Температурная зависимость изменений термодинамических функций алюминия марки А6 с кремнием и эталона (Al марки А5N)

Table 4. Temperature dependence of changes in the thermodynamic functions of aluminum grade A6 with silicon and the standard (Al grade A5N)

Содержание Si в сплаве, мас. %	$[H^0(T) - H^0(T_0^*)]$, кДж/кг для сплавов					
	300 К	400 К	500 К	600 К	700 К	800 К
Al марки А6	1,668603	94,26344	191,2442	292,5386	398,623	510,5218
0.5Si	1,667545	94,21899	191,173	292,4429	398,4913	510,3308
0.8Si	1,667459	94,2109	191,1415	292,3605	398,3207	510,0262
1.0 Si	1,665789	94,12424	190,9817	292,1421	398,0616	509,748
1.5Si	1,664033	94,0336	190,8066	291,8777	397,6963	509,2659
Эталон	1,670998	94,38695	191,471	292,8481	398,9913	510,9213
$[S^0(T) - S^0(T_0^*)]$, кДж/(кг·К) для сплавов						
Al марки А6	0,005579	0,271641	0,487871	0,67243	0,835856	0,98518
0.5Si	0,005576	0,271511	0,487681	0,672195	0,835567	0,984811
0.8Si	0,005575	0,271488	0,487607	0,672029	0,835266	0,984332
1.0 Si	0,005570	0,271237	0,487192	0,671507	0,834681	0,983721
1.5Si	0,005564	0,270975	0,486742	0,670894	0,833912	0,982797
Эталон	0,005587	0,271999	0,48846	0,67317	0,836688	0,986053
$[G^0(T) - G^0(T_0^*)]$, кДж/кг для сплавов						
Al марки А6	-0,00517	-14,393	-52,6914	-110,919	-186,477	-277,622
0.5Si	-0,00516	-14,3854	-52,6675	-110,874	-186,405	-277,518
0.8Si	-0,00516	-14,3844	-52,662	-110,857	-186,365	-277,44
1.0 Si	-0,00516	-14,3707	-52,6145	-110,762	-186,215	-277,229
1.5Si	-0,00515	-14,3565	-52,5643	-110,659	-186,042	-276,972
Эталон	-0,00517	-14,4125	-52,759	-111,054	-186,69	-277,922

A5N), описываемые уравнением типа:

$$C_{p_0}^0 = a + bT + cT^2 + dT^3 \quad (4)$$

где a, b, c, d – эмпирические коэффициенты, найденные для каждого образца опытным путем; T – температура, при которой определяют значение теплоемкости образцов. Значения коэффициентов уравнения (4) представлены в Таблице 2.

Для алюминия марки А6 с различным содержанием Si и эталонного алюминиевого образца (А1 марки А5N) исследовалось также влияние температуры на величины удельной теплоемкости в температурном интервале через каждые 100К (Таблица 3 и Рис. 3а). Показана следующая зависимость – величины теплоемкости данных образцов увеличиваются с повышением температуры, а при увеличении в образцах содержания Si от 0.5 до 1.5 мас. % снижаются.

С использованием вычисленных данных теплоемкости сплавов системы алюминий-кремний был рассчитан коэффициент теплоотдачи $\alpha(T)$ для алюминия марки А6 с различным содержанием Si и эталонного алюминиевого образца (А1 марки А5N) по следующей формуле:

$$\alpha = \frac{c_p^0 m \frac{dT}{dT_0}}{(T - T_0) \cdot S} \quad (5)$$

Изменение величин коэффициента теплоотдачи в зависимости от температуры для указанных сплавов показано на Рис. 3б. Видно, что с ростом температуры коэффициент теплоотдачи увеличивается, а в зависимости от содержания кремния в сплаве уменьшается.

Для выявления изменения термодинамических величин (энтальпии, энтропии, энергии Гиббса) от температуры интегрированием выражения (4) получены следующие выражения:

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

$$[S^0(T) - S^0(T_0)] = a \ln \frac{T}{T_0} + b(T - T_0) +$$

$$\frac{c}{2}(T^2 - T_0^2) + \frac{d}{3}(T^3 - T_0^3); \quad (7)$$

$$[G^0(T) - G^0(T_0)] = [H^0(T) - H^0(T_0)] - T[S^0(T) - S^0(T_0)], \quad (8)$$

где $T_0 = 298,15$ К.

Заключение

На основании проведенных исследований теплофизических свойств установлены следующие закономерности температурной зависимости теплоемкости и изменений термодинамических функций алюминия марки А6, легированного кремнием;

- выявлено, что значение теплоемкости с ростом температуры для всех алюминиевых сплавов растет, а от количества добавок легирующих компонентов уменьшается;

- получены полиномы, описывающие температурную зависимость теплоемкости и изменений термодинамических функций (энтальпии, энтропии, энергии Гиббса) сплавов двойных систем Al-Si в интервале температур 300–800 К. С помощью полученных полиномиальных зависимостей показано, что с ростом температуры энтальпия и энтропия указанных сплавов увеличиваются, а значение энергии Гиббса уменьшается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алиева С. Г., Альтман М. Б., Амбарцумян С. М. Промышленные алюминиевые сплавы: Справочник. М.: Металлургия, 1984. 528 с.
2. Kaufman J. G., Rooy E. L. Aluminum alloy castings: properties, processes, and applications. Materials Park: ASM International, 2004. 340 p.
3. Пригунова А. Г., Белов Н. А. [и др.] Силумины: Атлас структур и фактограмм: Справочное издание. Под ред. Тарана Ю. Н., Золоторевского В. С. М.: МИСиС, 1996. 175 с.
4. Хансен М., Андерко К. Структура двойных сплавов (пер. с англ.). Под ред. Новикова И. И., Рогельберга И. Л. М.: Металлургиздат, 1962. 1488 с.
5. Строганов Г. Б., Ротенберг В. А., Гершман Г. Б. Сплавы алюминия с кремнием. М.: Металлургия, 1977. С. 272.
6. Белов Н. А., Золоторевский В. С. Оптимизация состава малокремнистых силуминов для повышения механических свойств в литом состоянии // Известия вузов. Цветная металлургия. 2001. № 5. С. 67–76.
7. Таран Ю. Н., Мазур В. И. Структура эвтектических сплавов. М.: Металлургия, 1978. С. 236–280.
8. Ганиев И. Н., Пархутик П. А., Вахобов А. В. Модифицирование силуминов стронцием. Под ред. Горева К. В. Минск: Наука и техника, 1985. 143 с.
9. Zolotovskiy V. S., Belov N. A., Glazoff M. V. Casting aluminum alloys Elsevier Science, 2007. 530 p.
10. Белов Н. А. Фазовый состав промышленных и перспективных алюминиевых сплавов. М.: МИСиС, 2010. 511 с.
11. Ганиев И. Н., Файзуллоев Р. Дж., Зокиров Ф. Ш., Сафаров А. Г. Влияние кальция на удельную теплоемкость и изменение термодинамических функций алюминиевого проводникового сплава AlTi0.1 // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2023. Т. 26. № 1. С. 76–84.
12. Ганиев И. Н., Холмуродов Ф., Сафаров А. Г., Хакимов А. Х., Якубов У. Ш. Исследование удельной теплоемкости и изменений термодинамических функций алюминиевого сплава АЖ5К10, модифицированного барием // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2023. № 2 (44). С.

40–50.

13. Ганиев И. Н., Холмуродов Ф., Сафаров А. Г., Нуров Н. Р., Якубов У. Ш. Влияние добавок олова, свинца и висмута на теплофизические свойства и термодинамические функции алюминиевого сплава $AlFe5Si10$ // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. 2023. Т. 25. № 2. С. 26–35.

14. Ганиев И. Н., Ходжаназаров Х. М., Ходжаев Ф. К., Эшов Б. Б. Теплоемкость и термодинамические функции свинцового баббита БН_а ($PbSb15Sn10Na$), легированного натрием // Журнал физической химии. 2023. № 4. С. 469–475.

15. Ганиев И. Н., Ходжаназаров Х. М., Ходжаев Ф. К., Эшов Б. Б. Температурная зависимость теплоемкости и изменений

термодинамических функций свинцового баббита БЛ_и ($PbSb15Sn10Li$), легированного литием // Металлург. 2023. № 2. С. 101–106.

16. Ганиев И. Н., Одиназова Х. О., Ходжаев Ф. К., Ходжаназаров Х. М. Теплоемкость и термодинамические свойства свинцового баббита БК ($PbSb15Sn10K$), модифицированием калием в области 300–550К // Журнал «Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением». 2023. № 5. С. 108–113.

17. Ганиев И. Н., Ходжаев Ф. К., Одинаев А. Х., Ходжаназаров Х. М. Влияние бария на теплофизические свойства и термодинамические функции свинцового баббита Б ($PbSb15Sn10$) // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2024. № 1 (100). С. 76–88.

© 2026 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Бексеитова Гульмира Копшиловна – соискатель, Физико-технический институт имени С. У. Умарова Национальной академии наук Таджикистана (Душанбе, Республика Таджикистан), ORCID: 0009-0004-5926-3232, e-mail: g.bekseitova@agakaz.kz

Сафаров Амиршо Гоибович – доктор технических наук, главный научный сотрудник, Физико-технический институт имени С. У. Умарова Национальной академии наук Таджикистана (Душанбе, Республика Таджикистан), ORCID: 0009-0009-8517-3405, e-mail: amirsho71@mail.ru

Ганиев Изатулло Наврузович – доктор химических наук, профессор, заведующий лабораторией, Институт химии имени В. И. Никитина Национальной академии наук Таджикистана (Душанбе, Республика Таджикистан), ORCID: 0000-0002-2791-6508, e-mail: ganievizatullo48@gmail.com

Валиев Джемшед – соискатель, Физико-технический институт имени С. У. Умарова Национальной академии наук Таджикистана (Душанбе, Республика Таджикистан)

Заявленный вклад авторов:

Бексеитова Гульмира Копшиловна – постановка исследовательской задачи, концептуализация исследования, выводы, написание текста, научный менеджмент, сбор и теоретический анализ данных, обзор соответствующей литературы, экспериментальные исследования, обработка и анализ их результатов.

Сафаров Амиршо Гоибович – постановка исследовательской задачи, концептуализация исследования, выводы, написание текста, научный менеджмент, сбор и теоретический анализ данных, обзор соответствующей литературы, экспериментальные исследования, обработка и анализ их результатов.

Ганиев Изатулло Наврузович – постановка исследовательской задачи, концептуализация исследования, выводы, написание текста, научный менеджмент, сбор и теоретический анализ данных, обзор соответствующей литературы, экспериментальные исследования, обработка и анализ их результатов.

Валиев Джемшед – постановка исследовательской задачи, концептуализация исследования, выводы, написание текста, научный менеджмент, сбор и теоретический анализ данных, обзор соответствующей литературы, экспериментальные исследования, обработка и анализ их результатов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

EFFECT OF SILICON ADDITIVES ON THE THERMOPHYSICAL PROPERTIES AND THERMODYNAMIC CHARACTERISTICS OF A6 GRADE ALUMINUM

Gulmira K. Bekseitova, Amirsho G. Safarov,
Izatullo N. Ganiev, Jamshed Valiev

S. U. Umarov Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Tajikistan

* for correspondence: amirsho71@mail.ru



Article info

Received:

01 March 2026

Accepted for publication:

01 September 2026

Accepted:

15 September 2026

Keywords: aluminum grade A6, silicon, heat capacity, cooling mode, enthalpy, entropy, Gibbs energy

Abstract.

In this paper, the effect of silicon alloying additives on the thermophysical properties and thermodynamic characteristics of A6 aluminum was investigated in a wide temperature range of 300–800 K. Experimental studies were carried out in the controlled cooling mode, which made it possible to obtain reliable data on the temperature dependence of the specific heat capacity of alloys with different silicon contents. Aluminum alloys with a Si concentration of 0.5; 0.8; 1.0 and 1.5 wt.% were chosen as the objects of study, which makes it possible to trace the patterns of property changes depending on the degree of alloying. It was found that silicon additives have a noticeable effect on the thermophysical parameters of aluminum. In particular, with an increase in the silicon content, a change in the nature of the temperature dependence of the specific heat capacity is observed, which is associated with a modification of the structure and interatomic interactions in the alloys. The obtained experimental data were used to calculate the main thermodynamic functions: enthalpy, entropy and Gibbs energy. An analysis of the results revealed that increasing silicon concentration in the studied range leads to a slight decrease in enthalpy and entropy, which may be due to structural ordering and a decrease in the degree of thermal excitation of the system. At the same time, the Gibbs free energy tends to increase in the concentration range of 0.5–0.8–1.0–1.5 wt.% Si, indicating a change in the thermodynamic stability of the alloys and possibly associated with increased interphase interactions. The obtained results have important scientific and practical significance for understanding the mechanisms by which alloying elements influence the properties of aluminum alloys and can be used in the development of new materials with specified thermophysical and performance characteristics.

For citation: Bekseitova G.K., Safarov A.G., Ganiev I.N., Valiev Dzh. Effect of silicon additives on the thermophysical properties and thermodynamic characteristics of A6 grade aluminum. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2026; 4(176):89-97. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2026-4-89-97, EDN: RNXYNT

REFERENCES

1. Alieva S.G., Altman M.B., Ambartsumyan S.M. *Promyshlennyye alyuminiyevye splavy: spravochnik*. Moscow: Metallurgiya; 1984. 528 p.
2. Kaufman J.G., Rooy E.L. *Aluminum Alloy Castings: Properties, Processes, and Applications*. Materials Park: ASM International; 2004. 340 p.
3. Prigunova A.G., Belov N.A. [et al.] *Siluminy: Atlas struktur i fraktogramm*. Ed. by Taran Yu.N., Zolotarevsky V.S. Moscow: MISiS; 1996. 175 p.
4. Hansen M., Anderko K. *Structure of Binary Alloys*. Ed. by I.I. Novikov, I.L. Rogelberg. Moscow: Metallurgizdat; 1962. 1488 p.
5. Stroganov G.B., Rotenberg V.A., Gershman G.B. *Splavy alyuminiya s kremniem*. Moscow: Metallurgiya; 1977. 272 p.
6. Belov N.A., Zolotarevsky V.S. Optimization of low-silicon silumin composition for improved mechanical properties in as-cast state. *Izvestiya VUZov. Tsvetnaya metallurgiya*. 2001; 5:67-76.
7. Taran Yu.N., Mazur V.I. *Struktura evtekticheskikh splavov*. Moscow: Metallurgiya; 1978. Pp. 236-280.
8. Ganiev I.N., Parkhutik P.A., Vakhobov A.V. *Modifitsirovanie siluminov strontsiem*. Ed. by Gorev K.V. Minsk: Nauka i tekhnika; 1985. 143 p.
9. Zolotarevsky V.S., Belov N.A., Glazoff M.V. *Casting Aluminum Alloys*. Elsevier Science, 2007. 530 p.
10. Belov N.A. *Fazovyy sostav promyshlennykh i perspektivnykh alyuminiyevykh splavov*. Moscow: MISiS; 2010. 511 p.
11. Ganiev I.N., Fayzullov R.J., Zokirov F.Sh., Safarov A.G. Effect of calcium on heat capacity and thermodynamic functions of AlTi0.1 aluminum conductor alloy. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Materialy Elektronnoy Tekhniki*. 2023; 26(1):76-84.
12. Ganiev I.N., Kholmurodov F., Safarov A.G., Khakimov A.Kh., Yakubov U.Sh. Study of heat capacity and thermodynamic functions of AЖ5K10 aluminum alloy modified with barium. *Vestnik Sibirskogo*

Gosudarstvennogo Industrial'nogo Universiteta. 2023; 2(44):40-50.

13. Ganiev I.N., Kholmurodov F., Safarov A.G., Nurov N.R., Yakubov U.Sh. Effect of Sn, Pb, and Bi additions on thermophysical properties of AlFe5Si10 alloy. *PNRPU Mechanics Bulletin. Materials Science*. 2023; 25(2):26-35.

14. Ganiev I.N., Khodzhazarov Kh.M., Khodzhaev F.K., Eshov B.B. Heat capacity and thermodynamic functions of sodium-alloyed lead babbitt (PbSb15Sn10Na). *Russian Journal of Physical Chemistry A*. 2023; 4:469-475.

15. Ganiev I.N., Khodzhazarov Kh.M., Khodzhaev F.K., Eshov B.B. Temperature dependence

of heat capacity and thermodynamic functions of lithium-alloyed babbitt (PbSb15Sn10Li). *Metallurgist*. 2023; 2:101-106.

16. Ganiev I.N., Odinzoda Kh.O., Khodzhaev F.K., Khodzhazarov Kh.M. Heat capacity and thermodynamic properties of potassium-modified babbitt (PbSb15Sn10K) in the range 300–550 K. *Forging and Stamping Production. Materials Working by Pressure*. 2023; 5:108-113.

17. Ganiev I.N., Khodzhaev F.K., Odinaev A.Kh., Khodzhazarov Kh.M. Effect of barium on thermophysical properties of lead babbitt PbSb15Sn10. *Vestnik Saratov State Technical University*. 2024; 1(100):76-88.

© 2026 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

Gulmira K. Bekseitova – applicant, Physicotechnical Institute named after S.U. Umarov of the National Academy of Sciences of Tajikistan (Dushanbe, Republic of Tajikistan), ORCID: 0009-0004-5926-3232, e-mail: g.bekseitova@agakaz.kz

Amirsho G. Safarov – Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher, Physical-Technical Institute named after S. U. Umarov of the National Academy of Sciences of Tajikistan (Dushanbe, Republic of Tajikistan), ORCID: 0009-0009-8517-3405, e-mail: amirsho71@mail.ru

Izatullo N. Ganiev – Doctor of Chemical Sciences, Professor, Head of Laboratory, Institute of Chemistry named after V.I. Nikitin of the National Academy of Sciences of Tajikistan (Dushanbe, Republic of Tajikistan), ORCID: 0000-0002-2791-6508, e-mail: ganievizatullo48@gmail.com

Jamshed Valiev – PhD candidate, Physicotechnical Institute named after S. U. Umarov of the National Academy of Sciences of Tajikistan (Dushanbe, Republic of Tajikistan)

Contribution of the authors:

Gulmira K. Bekseitova – formulation of the research objective, research conceptualization, conclusions, manuscript writing, research management, data collection and theoretical analysis, literature review, experimental studies, and processing and analysis of results.

Amirsho G. Safarov – formulation of the research objective, conceptualization of the study, conclusions, manuscript writing, scientific management, data collection and theoretical analysis, literature review, experimental research, and processing and analysis of results.

Izatullo N. Ganiev – formulation of the research objective, conceptualization of the study, conclusions, manuscript writing, scientific management, data collection and theoretical analysis, literature review, experimental research, and processing and analysis of results.

Jamshed Valiev – formulation of the research objective, conceptualization of the study, conclusions, manuscript writing, research management, data collection and theoretical analysis, literature review, experimental research, and processing and analysis of results.

All authors have read and approved the final manuscript.

