

## РАДИОТЕХНИКА

УДК 669.713:536.63

DOI: 10.34680/2076-8052.2025.3(141).442-454

Поступила в редакцию / Received 27.06.2025

ГРНТИ 53.37.29+29.19.09

Специальность ВАК 2.2.13.; 2.6.17.

Принята к публикации / Accepted 28.10.2025

*Научная статья*

### ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК ЖЕЛЕЗА НА ТЕПЛОЕМКОСТЬ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ АЛЮМИНИЯ МАРКИ А6

Сафаров А. Г.<sup>1</sup>, Бексеитова Г. К.<sup>1</sup>, Ганиев И. Н.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Физико-технический институт имени С. У. Умарова Национальной академии наук Таджикистана  
(Душанбе, Республика Таджикистан)*

<sup>2</sup> *Институт химии имени В. И. Никитина Национальной академии наук Таджикистана  
(Душанбе, Республика Таджикистан)*

**Аннотация.** В условиях строго контролируемого термостатирования был выполнен детальный анализ влияния температуры на удельную теплоемкость, а также проведена оценка преобразований ключевых термодинамических характеристик алюминиевого сплава А6, легированного железом. Работы проводились в широком температурном интервале от 300 до 800 К. Показано, что прогревание образца в указанных пределах вызывает закономерное увеличение таких показателей, как теплоемкость, энтальпия и энтропия исследуемого материала. Одновременно было зафиксировано закономерное уменьшение значения энергии Гиббса, что является однозначным свидетельством сокращения объема свободной энергии в системе. Выявлено, что рост концентрации железной добавки в химическом составе алюминиевого сплава инициирует развитие противоположного эффекта. В данном случае была отмечена обратная зависимость: с повышением массовой доли железа удельная теплоемкость, энтальпия и энтропия образцов начинают снижаться.

**Ключевые слова:** алюминий марки А6, железо, теплоемкость, режим «охлаждения», энтальпия, энтропия, энергия Гиббса

**Для цитирования:** Сафаров А. Г., Бексеитова Г. К., Ганиев И. Н. Влияние добавок железа на теплоемкость и термодинамические функции алюминия марки А6 // Вестник НовГУ. 2025. 3 (141). 442–454. DOI: 10.34680/2076-8052.2025.3(141).442-454

*Research Article*

### INFLUENCE OF IRON ADDITIVES ON THE HEAT CAPACITY AND THERMODYNAMIC PROPERTIES OF A6 ALUMINUM

Safarov A. G.<sup>1</sup>, Bekseitova G. K.<sup>1</sup>, Ganiev I. N.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *S. U. Umarov Physical–Technical Institute of the National Academy of Sciences of Tajikistan  
(Dushanbe, Republic of Tajikistan)*

<sup>2</sup> *V. I. Nikitin Chemistry Institute of the Tajikistan Academy of Sciences (Dushanbe, Republic of Tajikistan)*

**Abstract.** Under strictly controlled thermostating conditions, a detailed analysis was carried out to examine the influence of temperature on the specific heat capacity, as well as to assess the transformations of key thermodynamic functions of the A6 aluminum alloy alloyed with iron. The experiments were performed over a wide temperature range from 300 to 800 K. It was shown that heating the sample within these limits results in a regular increase in such characteristics as heat capacity, enthalpy, and entropy of the investigated material. At the same time, a systematic decrease in Gibbs free energy was observed, which is clear evidence of a reduction in the amount of free energy in the system. It was further established that an increase in the concentration of iron in the chemical composition of the aluminum alloy initiates the development of the opposite effect. In this case, an inverse dependence was recorded: as the mass fraction of iron increases, the specific heat capacity, enthalpy, and entropy of the samples begin to decrease.

**Keywords:** *A6 aluminum, iron, heat capacity, “cooling” mode, enthalpy, entropy, Gibbs energy*

**For citation:** Bekseitova G. K., Ganiev I. N., Safarov A. G. Influence of iron additives on the heat capacity and thermodynamic properties of A6 Aluminum // Vestnik NovSU. 2025. 3 (141). 442–454. DOI: 10.34680/2076-8052.2025.3(141).442-454

## Введение

Создание новых алюминиевых сплавов, совершенствование методов их получения и повышение эксплуатационных характеристик невозможно без параллельного развития фундаментальных металлургических исследований. Наряду с решением прикладных технологических задач, именно научное осмысление процессов, происходящих в структуре сплавов, служит основой для прогресса в данной области. Качество легких алюминиевых материалов напрямую влияет на уровень технического развития в ключевых секторах промышленности [1, 2].

Железо повсеместно признано одним из наиболее часто встречающихся составляющих элементов в составе разнообразных алюминиевых сплавов. Его происхождение в материале чаще всего носит технологический характер: оно мигрирует в качестве неустраняемой побочной примеси на этапе промышленного производства первичного алюминия. Этот процесс неизбежен при стандартном использовании таких методов, как байеровский процесс получения глинозема и последующий электролиз по методу Холла–Эру. Помимо этого, значительным источником поступления железа служит вторичная переработка алюминийсодержащего металлолома, где оно выступает распространенным загрязнителем.

Впрочем, в некоторых случаях внесение железа осуществляется намеренно, в роли легирующей добавки, основной функцией которой является повышение твердости и прочности конечного продукта. Несмотря на это полезное свойство, избыточная концентрация данного элемента имеет серьезный побочный эффект – он провоцирует возрастание хрупкости, что в конечном итоге отрицательно влияет на комплекс механических характеристик материала, делая его менее пластичным и устойчивым к ударным нагрузкам.

Важнейшим фактором, определяющим поведение железа в алюминии, является его исключительно низкая растворимость в твердом растворе на основе алюминия. При максимальной равновесной температуре в 625°C этот показатель не превышает крайне малого значения в 0,04% по массе. Вследствие этого физико-химического ограничения избыточное железо не растворяется, а выделяется в виде самостоятельных интерметаллических фаз сложного состава [5].

Конкретный тип формирующихся соединений напрямую зависит от химического состава сплава (в частности, наличия кремния) и кинетических параметров процесса его кристаллизации. В широко распространенных алюминиевых сплавах системы алюминий–кремний (Al–Si) железо преимущественно образует стабильные фазы, среди которых наиболее типичными являются  $\alpha$ -Al<sub>8</sub>Fe<sub>2</sub>Si,  $\beta$ -Al<sub>5</sub>FeSi и  $\delta$ -Al<sub>9</sub>FeSi<sub>2</sub>.

Стоит подчеркнуть, что среди всего разнообразия интерметаллидов в силу термодинамической стабильности и кинетических преимуществ именно игольчатая фаза  $\beta\text{-Al}_5\text{FeSi}$  является наиболее распространенной. Она оказывает выраженное негативное влияние на механические характеристики материала. В микроструктуре она проявляется в виде игольчатых включений с характерными насечками, вдоль которых могут образовываться микротрещины. Такие дефекты снижают прочность и надежность сплава, особенно при динамических нагрузках [6].

Согласно литературным данным, алюминиевые сплавы с железом обладают разнообразными физико-химическими свойствами, описанными в ряде источников [7, 8]. Однако в доступных публикациях отсутствует информация о термодинамических характеристиках алюминия марки А6, легированного железом, что подчеркивает актуальность настоящего исследования.

*Цель работы* – определить влияние добавок железа на термодинамическое поведение алюминия А6. Исследование направлено на анализ температурной зависимости удельной теплоемкости, а также изменений таких термодинамических параметров, как энтальпия, энтропия и энергия Гиббса при варьировании содержания железа.

### Экспериментальная часть

Экспериментальное получение алюминиевых сплавов выполняли в лабораторной печи сопротивления шахтного типа СШОЛ, поддерживая температурный диапазон 750–800°C. Исходными материалами выступали алюминий марки А6 и железа, вводимое в количестве от 0,5 до 1,5 мас.%. Расплавленный металл разливали в графитовые литейные формы для получения цилиндрических образцов размером  $\varnothing 16 \times 30$  мм.

Химический состав сплавов определялся в Центральной лаборатории ГУП «TALCO», специализирующейся на производстве алюминия. Дополнительный контроль над точностью состава осуществлялся путем сравнительного взвешивания образцов до и после плавки. К дальнейшему анализу допускались только те образцы, у которых отклонение массы не превышало 2% от исходного значения.

Способность материала накапливать тепловую энергию, известная как теплоемкость, представляет собой ключевое физическое свойство твердых тел. Оно количественно характеризует, как изменяется внутренняя энергия вещества при нагреве или охлаждении. Анализ поведения теплоемкости в зависимости от температуры предоставляет ценную информацию о материале, позволяя установить такие параметры, как: точка и механизм фазовых превращений, характеристическая температура Дебая, энергия, требуемая для образования дефектов кристаллической решетки по типу вакансий, вклад свободных электронов в теплоемкость, а также иные существенные термодинамические характеристики.

Теплоемкость играет важнейшую роль в расчетах термодинамических функций и широко применяется в моделировании поведения материалов при различных температурных режимах. Для большинства твердых веществ ее значения могут быть получены исключительно экспериментальным путем, обеспечивающим необходимую точность для инженерных и технологических приложений. Определение теплоемкости при нестандартных температурах для ранее не изученных материалов представляет собой сложную, но крайне значимую задачу в области прикладной науки и материаловедения.

В научных публикациях представлено множество экспериментальных методик исследования физических характеристик твердых тел, демонстрирующих трансформацию их состояния под влиянием температурных колебаний. Наибольшее распространение получила техника, основанная на фиксации разницы в скорости охлаждения между изучаемым объектом и эталонным образцом в соответствии с принципами ньютоновской теплопередачи. Данный подход дает возможность не только выявлять точки фазовых превращений, но и устанавливать значения других важных теплофизических констант.

В данном исследовании использован авторский способ, предполагающий сопоставительный анализ теплоемкости испытуемого образца с эталоном, имеющим известные термодинамические свойства. Разработанная методика адаптирована для высокотемпературных измерений и гарантирует высокую достоверность при определении удельной теплоемкости [9, 10].

Вычисление теплоемкости основывается на системе фундаментальных уравнений. Количество тепловой энергии, рассеиваемой элементарным объемом  $dV$  металлического образца за бесконечно малый временной интервал  $d\tau$ , описывается следующим соотношением:

$$\delta Q = C_p^0 \cdot \rho \frac{dT}{d\tau} \cdot dV \cdot d\tau, \quad (1)$$

где  $C_p^0$  – удельная теплоемкость;  $\rho$  – плотность материала;  $T$  – температура образца. Принято допущение о равномерном распределении температуры внутри тела, что справедливо ввиду малых геометрических размеров образца и высокой теплопроводности металлических материалов.

В качестве альтернативы, величину тепловых потерь ( $\delta Q$ ) возможно определить в соответствии с законом охлаждения Ньютона-Рихмана:

$$\delta Q = \alpha (T - T_0) \cdot dS \cdot d\tau, \quad (2)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи,  $T_0$  – температура окружающей среды,  $dS$  – элемент поверхности.

Полученные уравнения (1) и (2) приравниваем между собой и получаем уравнение:

$$C_P^0 \cdot \rho \frac{dT}{d\tau} dV = \alpha \cdot (T - T_0) \cdot dS, \quad (3)$$

Полное количество тепловой энергии, которое в целом теряет весь объем образца, описывается следующим выражением:

$$Q = \int_V C_P^0 \cdot \rho \frac{dT}{d\tau} \cdot dV = \int_S \alpha \cdot (T - T_0) \cdot dS, \quad (4)$$

При допущении, что параметры  $C_P^0$ ,  $\rho$  и  $\frac{dT}{d\tau}$  остаются постоянными в пределах всего объема, а характеристики  $\alpha$ ,  $T$  и  $T_0$  однородны по всей поверхности образца, исходное уравнение сводится к упрощенной форме:

$$C_P^0 \cdot \rho \cdot V \frac{dT}{d\tau} = \alpha \cdot (T - T_0) \cdot S, \quad (5)$$

или

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

где  $S$  – площадь поверхности,  $\rho \cdot V = m$  – масса,  $V$  – объем образца.

Рассмотрим выражение (6) применительно к двум образцам, имеющим идентичные геометрические параметры. В этом случае можно считать, что их поверхности равны:  $S_1 = S_2$ , температуры совпадают:  $T_1 = T_2$ , а коэффициенты теплоотдачи также одинаковы:  $\alpha_1 = \alpha_2$ . При делении одного уравнения на другое получаем соотношение:

$$C_{P1}^0 = C_{P2}^0 \cdot \frac{m_2}{m_1} \cdot \frac{\left(\frac{dT}{d\tau}\right)_2}{\left(\frac{dT}{d\tau}\right)_1} = C_{P2}^0 \cdot \frac{m_2}{m_1} \cdot \frac{\left(\frac{\Delta T}{\Delta \tau}\right)_2}{\left(\frac{\Delta T}{\Delta \tau}\right)_1} \quad (7)$$

Следовательно, располагая данными о массах образцов  $m_1$  и  $m_2$ , скоростях их охлаждения при определенной температуре, а также имея значение удельной теплоемкости эталонного материала  $C_{P2}^0$ , можно вычислить для исследуемого образца  $C_{P1}^0$  значение его удельной теплоемкости с помощью следующего соотношения:

$$C_{P1}^0 = C_{P2}^0 \cdot \frac{m_2}{m_1} \cdot \frac{\left(\frac{dT}{d\tau}\right)_2}{\left(\frac{dT}{d\tau}\right)_1}, \quad (8)$$

где  $m_1 = \rho_1 V_1$  – масса 1-го образца,  $m_2 = \rho_2 V_2$  – масса 2-го образца,  $\left(\frac{dT}{d\tau}\right)_1$ ,  $\left(\frac{dT}{d\tau}\right)_2$  – скорости охлаждения исследуемого и эталонного образцов соответственно при одинаковой температуре.

В нашем исследовании значения теплоемкости образцов осуществляли на специализированном измерительном комплексе, принципиальная схема которого приведена на рисунке 1.

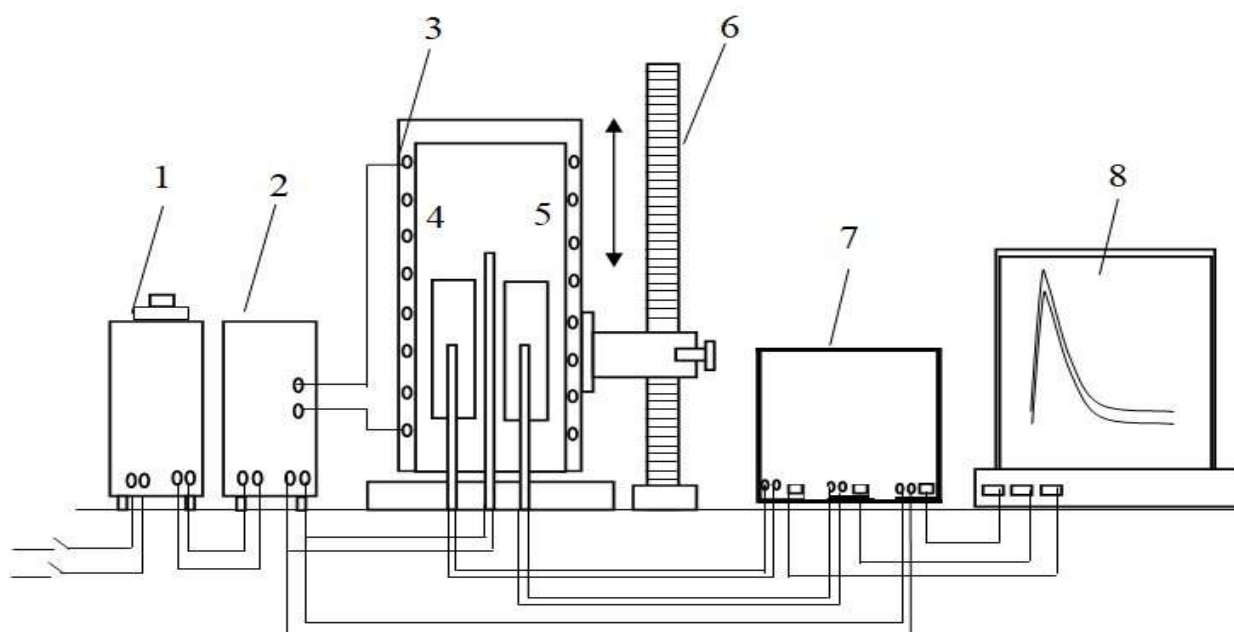


Рисунок 1. Схема термометрической экспериментальной установки для измерения теплоемкости твердых тел при охлаждении

Экспериментальный комплекс состоит из ряда основных элементов. Нагревательный блок – электропечь (3) смонтирована на вертикальной станине (6), обеспечивающей ее перемещение по вертикальной траектории, обозначенной стрелочным указателем. Испытуемые образцы (4) и калибровочные эталоны (5), обладающие кинематической свободой, выполнены в цилиндрической конфигурации с геометрическими параметрами  $\varnothing 16 \times 30$  мм. В торцевой части каждого цилиндра выполнены технологические пазы для размещения термоэлектрических преобразователей (4 и 5), гарантирующих прецизионный температурный контроль. Сигналы с термопар поступают на многоканальный измерительный комплекс (7), интегрированный с вычислительной системой (8) для фиксации и последующего анализа экспериментальных данных.

Погрешность температурных измерений не превышает  $\pm 1\%$  в интервале  $40-400^\circ\text{C}$  и  $\pm 2,5\%$  в области свыше  $400^\circ\text{C}$ . Методическая погрешность определения теплоемкости составляет менее  $4\%$ , что подтверждает высокую достоверность экспериментальных данных.

Полученные температурно-временные зависимости для исследованных сплавов с высокой точностью аппроксимируются уравнением следующей формы:

$$T = ae^{-b\tau} + pe^{-k\tau}, \quad (9)$$

где  $a$ ,  $b$ ,  $p$ ,  $k$  – постоянные параметры, характеризующие данный образец,  $T$  – время охлаждения.

Проведя операцию дифференцирования уравнения (9) по времени  $T$ , было получено расчетное соотношение, позволяющее определить скорость охлаждения материала в процессе исследования:

$$\frac{dT}{d\tau} = -abe^{-b\tau} - pke^{-k\tau}. \quad (10)$$

Путем анализа уравнения (10) были установлены значения скоростей охлаждения как для эталонного материала, так и для сплавов алюминий-железо.

Определение теплоемкости осуществлялось в режиме программируемого снижения температуры с использованием методических подходов, подробно описанных в научных публикациях [11, 12]. В ходе экспериментальных исследований изучалось изменение удельной теплоемкости и основных термодинамических параметров алюминиево-железных сплавов при температурных воздействиях в диапазоне 300–800 К. Графическое представление полученных зависимостей приведено на рисунке 2а.

Анализ кривых охлаждения показал, что температурные изменения для всех образцов происходят синхронно и демонстрируют схожую динамику. При этом на графиках не наблюдаются термические плато, которые могли бы свидетельствовать о наличии фазовых превращений или структурных переходов в исследуемых сплавах.

В результате анализа экспериментальных кривых охлаждения были определены численные значения параметров  $a$ ,  $b$ ,  $p$ ,  $k$ , а также произведений  $ab$ ,  $pk$ , входящих в уравнение (10). Все полученные коэффициенты представлены в сводной таблице 1.

Таблица 1. Коэффициенты уравнения (10), характеризующие термофизические свойства алюминиево-железных сплавов

Содержание железа в алюминии марки А6, мас. %	$a$ , К	$b \cdot 10^{-3}$ , $c^{-1}$	$p$ , К	$k \cdot 10^{-4}$ , $c^{-1}$	$a \cdot b$ , $K \cdot c^{-1}$	$pk \cdot 10^{-2}$ , $K \cdot c^{-1}$
Эталон (А5N)	473,0850	4,67	344,7507	1,55	2,21	5,35
А6	480,7551	4,58	335,0815	1,27	2,20	4,26
0,5Fe	480,7312	4,58	332,6087	1,28	2,20	4,26
0,8Fe	480,7196	4,58	331,5208	1,29	2,20	4,27
1,0Fe	480,7111	4,58	330,7297	1,29	2,20	4,27
1,5Fe	480,7058	4,58	330,2352	1,29	2,20	4,27

Расчет скоростей охлаждения исследуемых образцов проводился на основе уравнения (10), позволяющего с высокой точностью оценить динамику температурных изменений. Графики, иллюстрирующие изменение скорости охлаждения алюминиево-железных сплавов, приведены на рисунке 2б.

Определение удельной теплоемкости алюминиево-железных сплавов осуществлялось на основе расчетов по формуле (8). В ходе анализа экспериментальных данных были получены температурные зависимости

теплоемкости как для исследуемых материалов, так и для эталонного образца – алюминия марки А5N. Формула, описывающая поведение теплоемкости в зависимости от температуры, имеет следующий вид:

$$C_p^0 = a + bT + cT^2 + dT^3, \quad (11)$$

где  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  – эмпирические параметры, определенные экспериментально для каждого конкретного образца,  $T$  – температура, при которой проводился расчет теплоемкости. Численные значения коэффициентов, входящих в уравнение (11), были получены в результате обработки экспериментальных кривых охлаждения (таблица 2).

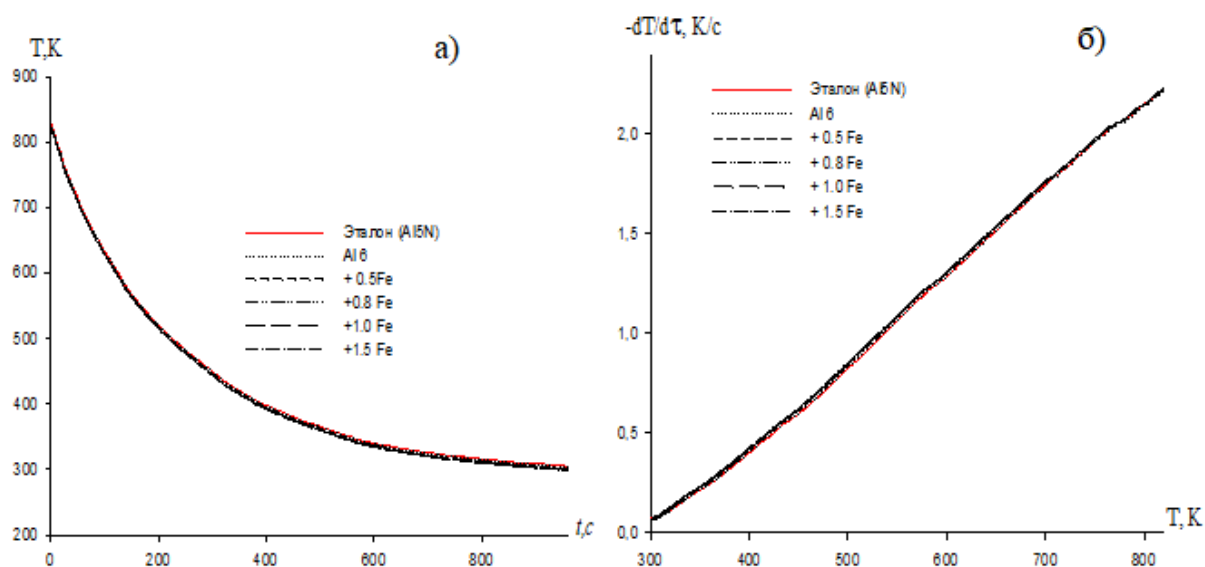


Рисунок 2. Динамика охлаждения: температурные и скоростные профили для сплавов Al–Fe и эталонного алюминия

Таблица 2. Расчетные коэффициенты  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  уравнения (11) для алюминия А6 с добавлением Fe

Содержание железа в алюминии марки А6, мас. %	$a$ , Дж/(кг·К)	$b$ , Дж/(кг·К <sup>2</sup> )	$c$ , Дж/(кг·К <sup>3</sup> )	$d$ , Дж/(кг·К <sup>4</sup> )	Коэффициент корреляции R
Эталон (А5N)	690,3491	1,0100	-0,00127	0,000000913	1,0
А6	688,6392	1,0113	-0,00127	0,000000914	0,999
0,5Fe	687,2913	1,0112	-0,00127	0,000000914	0,999
0,8Fe	685,9206	1,0112	-0,00127	0,000000914	0,998
1,0Fe	685,0702	1,0111	-0,00127	0,000000913	0,998
1,5Fe	682,7891	1,0111	-0,00127	0,000000913	0,998

Таблица 3 содержит обобщенные результаты расчетов, отражающих температурную зависимость удельной теплоемкости для сплавов на основе алюминия с добавлением железа. Анализ представленных данных показывает, что по мере повышения температуры наблюдается закономерное увеличение



теплоемкости исследуемых материалов. В то же время рост концентрации железа в алюминиевой матрице приводит к снижению удельной теплоемкости.

Таблица 3. Параметры теплоемкости сплавов Al–Fe (кДж/(кг·К)) в температурном диапазоне

Содержание железа в алюминии марки А6, мас. %	Т, К					
	300	400	500	600	700	800
Эталон (А5N)	903,7001	949,5811	991,9741	1036,3571	1088,2081	1153,0051
А6	902,4072	948,4552	991,0392	1035,6432	1087,7512	1152,8472
0,5Fe	901,0293	947,0673	989,6413	1034,2353	1086,3333	1151,4193
0,8Fe	899,6586	945,6966	988,2706	1032,8646	1084,9626	1150,0486
1,0Fe	898,7512	944,7422	987,2452	1031,7382	1083,6992	1148,6062
1,5Fe	896,4701	942,4611	984,9641	1029,4571	1081,4181	1146,3251

На основе ранее вычисленных значений удельной теплоемкости алюминиево-железных сплавов, а также экспериментально определенных скоростей их охлаждения, был произведен расчет температурной зависимости коэффициента теплоотдачи  $\alpha(T)$  как для эталонного материала – алюминия марки А5N, так и для исследуемых сплавов системы алюминий–железо. Расчет выполнялся по следующему выражению:

$$\alpha = \frac{C_p^0 m \frac{dT}{d\tau}}{(T - T_0) \cdot S} \quad (12)$$

Температурная зависимость коэффициента теплоотдачи для алюминиево-железных сплавов представлена на рисунке 3. Анализ графиков демонстрирует четкую закономерность: по мере увеличения содержания железа в алюминиевой основе наблюдается снижение коэффициента теплоотдачи. Это указывает на то, что легирование железом снижает интенсивность теплопередачи между материалом и окружающей средой, вероятно, за счет изменения микроструктуры и термодинамических характеристик сплава.

Для определения температурной зависимости термодинамических функций – таких как энтальпия, энтропия и энергия Гиббса – для алюминиево-железных сплавов были применены расчеты на основе интегральных выражений, включающих удельную теплоемкость. В качестве исходных данных использовались значения теплоемкости, полученные по уравнению (10), а сами вычисления проводились согласно формулам (13)–(15):

$$[H^0(T) - H^0(T_0)] = a(T - T_0) + \frac{b}{2}(T^2 - T_0^2) + \frac{c}{3}(T^3 - T_0^3) + \frac{d}{4}(T^4 - T_0^4), \quad (13)$$

$$[S^0(T) - S^0(T_0)] = a \ln \frac{T}{T_0} + b(T - T_0) + \frac{c}{2}(T^2 - T_0^2) + \frac{d}{3}(T^3 - T_0^3), \quad (14)$$

$$[G^0(T) - G^0(T_0)] = [H^0(T) - H^0(T_0)] - T[S^0(T) - S^0(T_0)]. \quad (15)$$

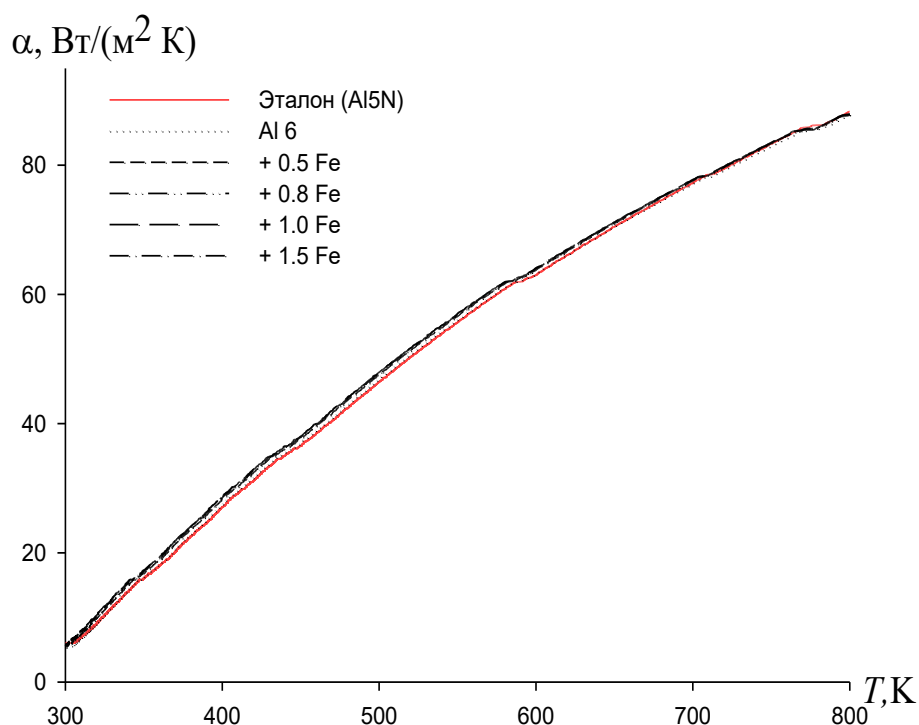


Рисунок 3. Зависимость коэффициента теплоотдачи от температуры для сплавов Al–Fe и эталонного алюминия (марка А5N)

В таблице 4 представлены обобщенные результаты расчетов, отражающие изменения термодинамических функций (энтальпии, энтропии и энергии Гиббса) для алюминиево-железных сплавов с шагом по температуре в 100 К. Эти данные получены на основе интегральных выражений, включающих удельную теплоемкость.

Анализ полученных данных показал, что в температурном диапазоне 300–800 К энтальпия и энтропия алюминиево-железных сплавов демонстрируют устойчивую тенденцию к увеличению с ростом температуры. При этом повышение содержания железа в алюминиевой матрице приводит к снижению этих термодинамических параметров. Энергия Гиббса, напротив, уменьшается с повышением температуры, проявляя противоположную зависимость по сравнению с энтальпией и энтропией.

Таблица 4. Изменение термодинамических функций алюминия марки А6 с добавлением Fe в зависимости от температуры

Содержание Fe в Al марки А6, мас. %	$[H^0(T) - H^0(T_0^*)]$ , кДж/кг для сплавов					
	300 К	400К	500К	600К	700К	800К
Эталон (А5N)	1,670998	94,38695	191,471	292,8481	398,9913	510,9213
А6	1,668603	94,26344	191,2442	292,5386	398,623	510,5218
0,5Fe	1,666055	94,1226	190,964	292,1182	398,0612	509,8178
0,8Fe	1,663519	93,983	190,6874	291,7044	397,5104	509,1299
1,0Fe	1,661841	93,8884	190,494	291,4038	397,0906	508,5751
1,5Fe	1,657621	93,65607	190,0336	290,7152	396,1739	507,4304
$[S^0(T) - S^0(T_0^*)]$ , кДж/(кг·К) для сплавов						
Эталон (А5N)	0,005587	0,271999	0,48846	0,67317	0,836688	0,986053
А6	0,005579	0,271641	0,487871	0,67243	0,835856	0,98518
0,5Fe	0,005571	0,271235	0,487154	0,671457	0,834666	0,983799
0,8Fe	0,005562	0,270832	0,486445	0,670498	0,833496	0,982447
1,0Fe	0,005557	0,270559	0,485953	0,66981	0,832624	0,981395
1,5Fe	0,005543	0,269889	0,484773	0,668215	0,830678	0,979144
$[G^0(T) - G^0(T_0^*)]$ , кДж/кг для сплавов						
Эталон (А5N)	-0,00517	-14,4125	-52,759	-111,054	-186,69	-277,922
А6	-0,00517	-14,393	-52,6914	-110,919	-186,477	-277,622
0,5Fe	-0,00516	-14,3713	-52,613	-110,756	-186,205	-277,222
0,8Fe	-0,00515	-14,3498	-52,5353	-110,594	-185,937	-276,827
1,0Fe	-0,00514	-14,3353	-52,4823	-110,482	-185,747	-276,541
1,5Fe	-0,00513	-14,2995	-52,3531	-110,214	-185,300	-275,885

$T_0 = 298,15$  К.

### Заключение

В рамках данного исследования удалось вывести аппроксимирующие полиномы, которые с высокой точностью описывают взаимосвязь между температурой и ключевыми термодинамическими характеристиками сплавов алюминия с железом. Полученные математические модели адекватно отражают поведение удельной теплоемкости, а также изменение таких фундаментальных функций, как энтальпия, энтропия и энергия Гиббса. Достоверность предложенных аппроксимаций подтверждается исключительно высоким коэффициентом детерминации, достигающим значения  $R_{кор.}=0,998$ . Проведенный анализ выявил четкую закономерность: при росте температуры наблюдается закономерное увеличение теплоемкости, энтальпии и энтропии, в то время как энергия Гиббса демонстрирует противоположную динамику, последовательно уменьшаясь. Кроме того, увеличение концентрации железа в сплаве оказывает умеренное влияние на снижение теплоемкости, что может быть связано с изменением фазового состава и структурной организации материала.

### Список литературы

1. Луц А. Р., Суслина А. А. Алюминий и его сплавы: учебное пособие. Самара: Самарский государственный технический университет, 2013. 81 с.

2. Мондольфо Л. Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов. Москва: Металлургия. 1979. 640 с.
3. Зиновьев В. Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах: справочник. Москва: Металлургия, 1989. 384 с.
4. Джалолов Ф. Н., Умарова Т. М. Синтез и физико-химические свойства сплавов системы Al-Fe (1,8%), модифицированных европием // Вестник Филиала Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова в городе Душанбе. 2017. 1 (3). 108–113.
5. Ташлыкова-Бушкевич И. И., Гутько Е. С., Шепелевич В. Г. Зависимость микроструктуры быстрозатвердевших сплавов Al-Fe от фазового состава // Взаимодействие излучений с твердым телом: материалы 7-й Международной конференции, Минск, 26–28 сентября 2007 г. Минск: Изд. центр БГУ, 2007. 62–64.
6. Букин Д. О., Калинин А. А., Морозова А. И., Могучева А. А. Структура и свойства Al-Fe-Si-Zr сплава после ДТО // Тезисы докладов Международных конференций «Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций» и «Химия нефти и газа» в рамках Международного симпозиума «Иерархические материалы: разработка и приложения для новых технологий и надежных конструкций», Томск, 1–5 октября 2018 г. Томск: Издательский дом Томского государственного университета, 2018. 391–397. DOI: 10.17223/9785946217408/251
7. Прядезников Б. Ю., Тарасов П. П. Исследование процессов жидкофазного спекания сплавов системы Al-Fe с различными видами легирующей добавки // Богатство России: всероссийский форум научной молодежи, 4–6 декабря 2017 г.: сборник докладов. Москва: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. 180–182.
8. Галанин С. И., Макшанчиков И. А. Особенности анодной поляризации алюминиевого сплава при электрохимическом оксидировании импульсами тока // Физика и химия обработки материалов. 2006. 5. 78–81.
9. Чинов В. Ю., Арышенский Е. В., Сарычев В. Д., Клепов Д. Н. Определение зависимости теплоёмкости от концентрации переходных металлов в алюминиевых сплавах на примере Al-Sc // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения: труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Новокузнецк, 15–16 мая 2024 г. Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет, 2024. С. 21–24.
10. Исмонов Р. Д. Температурная зависимость теплоемкости и изменение термодинамических функций сплава АБ1 (Al+1%Be), модифицированного галлием // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. 2021. 3 (55). 31–34.
11. Ганиев И. Н., Сафаров А. Г., Одинаев Ф. Р., Якубов У. Ш., Кабутов К. Температурная зависимость теплоёмкости и изменений термодинамических функций сплава АЖ4,5 с висмутом // Металлы. 2020. 1. 21–29.
12. Ганиев И. Н., Сафаров А. Г., Одинаев Ф. Р., Якубов У. Ш., Кабутов К. Температурная зависимость теплоёмкости и изменение термодинамических функций сплава АЖ4.5 с оловом // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. 2019. 1. 50–58. DOI: 10.17073/0021-3438-2019-1-50-58

## References

1. Lutz A. R., Suslina A. A. Aluminum and its alloys: a textbook. Samara: Samara State Technical University Publ., 2013. 81 p. (In Russian).
2. Mondolfo L. F. Structure and properties of aluminum alloys. Moscow: Metallurgy Publ., 1979. 640 p. (In Russian).
3. Zinoviev V. E. Thermophysical properties of metals at high temperatures: handbook. Moscow: Metallurgy Publ., 1989. 384 p. (In Russian).

4. Dzhallolov F. N., Umarova T. M. Synthesis and physico-chemical properties of alloys of the Al-Fe system (1.8%) modified with europium // Bulletin of the Branch of the Lomonosov Moscow State University in the city of Dushanbe. 2017. 1 (3). 108–113. (In Russian).
5. Tashlykova-Bushkevich I. I., Gutko E. S., Shepelevich V. G. Dependence of the microstructure of rapidly hardened Al-Fe alloys on the phase composition // Interaction of radiation with a solid: proceedings of the 7th international conference, Minsk, September 26-28, 2007. Minsk: BSU Publ., 2007. P. 62–64. (In Russian).
6. Bukin D. O., Kalinenko A. A., Morozova A. I., Mogucheva A. A. Structure and properties of the Al-Fe-Si-Zr alloy after DTO // Abstracts of the international conferences "Promising materials with a hierarchical structure for new technologies and reliable structures" and "Chemistry of oil and Gas" within the framework of the International Symposium "Hierarchical Materials: development and applications for new technologies and reliable structures", Tomsk, October 1–5, 2018. Tomsk: Tomsk State University Publ., 2018. P. 391–397. DOI: 10.17223/9785946217408/251 (In Russian).
7. Pryadeznikov B. Yu., Tarasov P. P. Investigation of the processes of liquid-phase sintering of alloys of the Al-Fe system with various types of alloying additives // The wealth of Russia: All-Russian scientific youth forum, December 4-6, 2017: collection of reports. Moscow: Bauman Moscow State Technical University Publ., 2018. P. 180–182. (In Russian).
8. Galanin S. I., Makshanchikov I. A. Features of anodic polarization of aluminum alloy during electrochemical oxidation by current pulses // Fizika i khimiya obrabotki materialov. 2006. 5. 78–81. (In Russian).
9. Chinov V. Yu., Aryshenskiy E. V., Sarychev V. D., Klepov D. N. Determination of the dependence of heat capacity on the concentration of transition metals in aluminum alloys using the example of Al-Sc // Science and youth: problems, searches, solutions: proceedings of the All-Russian scientific conference of students, postgraduates and young scientists, Novokuznetsk, May 15-16 2024. Novokuznetsk: Siberian State Industrial University Publ., 2024. P. 21–24. (In Russian).
10. Ismonov R. D. temperature dependence of the heat capacity and change in the thermodynamic functions of the AB1 (AL+1% BE) alloy modified with gallium // Polytechnic bulletin. Series: engineering studies. 2021. 3 (55). 31–34. (In Russian).
11. Ganiev I. N., Safarov A. G., Odinaev F. R., Yakubov U. Sh., Kabutov K. Temperature dependence of the specific heat and the changes in the thermodynamic functions of a bismuth-bearing AZH4.5 alloy // Metally. 2020. 1. 21–29. (In Russian).
12. Ganiev I. N., Safarov A. G., Odinaev F. R., Yakubov U. Sh., 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. DOI: 10.17073/0021-3438-2019-1-50-58 (In Russian).

#### Информация об авторах

*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, amirsho71@mail.ru

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

*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, ganievizatullo48@gmail.com