

УДК 004.942.001.57

ВЛИЯНИЕ ДОБАВКИ ОЛОВА НА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА AlFe5Si10

© 2024 г. И. Н. Ганиев^{1, *}, Ф. Холмуродов², А. Г. Сафаров², Н. Р. Нуров²,
У. Ш. Якубов¹, К. Ботуров²

¹Институт химии им. В.И. Никитина НАН Таджикистана, Душанбе, Республика Таджикистан

²Физико-технический институт им. С.У. Умарова НАН Таджикистана, Душанбе, Республика Таджикистан

*E-mail: ganievizatullo48@gmail.com

Поступила в редакцию 29.08.2022 г.

После доработки 31.12.2022 г.

Принята к публикации 11.05.2023 г.

В режиме охлаждения исследована температурная зависимость удельной теплоемкости и изменения термодинамических функций алюминиевого сплава AlFe5Si10 с оловом в интервале температур 300–800 К. Показано, что с увеличением концентрации олова теплоемкость, коэффициент теплоотдачи алюминиевого сплава AlFe5Si10 уменьшаются, а с увеличением температуры растут. Установлено, что с возрастанием температуры энтальпия и энтропия сплавов увеличиваются, энергия Гиббса уменьшается, а при повышении содержания олова в сплаве наблюдается обратная зависимость.

DOI: 10.31857/S0040364424010075

ВВЕДЕНИЕ

В современных материалах должны сочетаться высокие значения свойств и качество для обеспечения необходимого ресурса и надежности работы изделий авиационно-космической техники, машиностроения, атомной энергетики, радиотехники, электроники и т.д. В связи с этим особое значение приобретают производство и использование сплавов алюминия, обладающих высокой коррозионной стойкостью, механической прочностью и другими специфическими свойствами.

Особый интерес для современного машиностроения представляют высокопрочные литейные алюминиевые сплавы со свойствами идентичных деформируемых сплавов. Основным фактором, определяющим механические и технологические свойства литейного сплава, является состав, в том числе и содержание вредных примесей и газов, зависящее от технологии плавки, а также состава исходных материалов и флюсов [1, 2].

К настоящему времени значительно возросли требования к новым конструкционным материалам с высокими эксплуатационными характеристиками, в частности коррозионной устойчивостью. Следовательно, разработка таких материалов на основе сплавов алюминия с малыми

добавками модифицирующих элементов, обладающих повышенными показателями коррозионной устойчивости, является требованием времени и новой техники. Большой интерес к сплавам системы Al-Fe связан с высоким содержанием во вторичном алюминии железа (5–6%) и с тем, что он не находит широкого применения из-за низких прочностных характеристик [3].

Примеси железа в алюминии оказывают существенное влияние на качество алюминия. С увеличением их количества значительно ухудшается коррозионная стойкость. При этом уменьшаются электропроводность и пластичность, повышается прочность металла. Такой металл по примесям не укладывается в рамки требований ГОСТ Р 55375–2012 на первичный алюминий и не находит потребителя, за исключением использования для раскисления и дегазации стали [4, 5].

Следовательно, разработка прецизионных сплавов на основе некондиционного алюминия путем его легирования третьим элементом является актуальной задачей. Подобный подход позволяет превратить некондиционный металл в нужный и полезный продукт для техники. Иногда для блокировки отрицательного влияния железа сплавы легируют марганцем в количествах 0.5–1.0%. В фазе до 1/10 часть атомов железа может замещаться

атомами марганца. В результате образуется новая фаза $(\text{Fe}, \text{Mn})\text{Al}_3$. Кристаллы указанной фазы отличаются более компактной формой, в отличие от игольчатой структуры фазы FeAl_3 [6, 7].

Для изменения формы кристаллов интерметаллида в эвтектике $\alpha\text{-Al} + \text{FeAl}_3$, т.е. ее модификации, в качестве модифицирующего элемента выбрано металлическое олово как поверхностно активный компонент тройного сплава. Подобный подход позволяет разработать новые композиции сплавов на основе алюминия. Выбор исходного сплава $\text{Al} + 5 \text{ мас. \% Fe} + 10 \text{ мас. \% Si}$ объясняется тем, что состав данного сплава включает эвтектики $\alpha\text{-Al} + \text{FeAl}_3$ и $\alpha\text{-Al} + \text{Si} + \text{FeSiAl}_5$, которые примыкают к алюминиевому углу системы Al-Fe-Si и плавятся при температуре $670\text{--}727^\circ\text{C}$ [6, 7].

Одной из важнейших характеристик сплавов является теплоемкость. Данные о теплоемкости дают возможность решать насущные задачи фундаментальной термодинамики конденсированных сред, особенно если учесть их исключительную важность с научно-технической точки зрения [8–14].

Эти сведения позволяют определить области практического использования новых материалов на основе алюминия с улучшенными физическими свойствами [15–17].

Цель работы заключается в исследовании влияния добавок олова на температурную зависимость теплоемкости и термодинамических функций алюминиевого сплава $\text{AlFe}_5\text{Si}_{10}$, предназначенного для использования в качестве анодного материала при литье протекторов для защиты от коррозии стальных конструкций.

МАТЕРИАЛЫ, ТЕОРИЯ МЕТОДА И ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Сплав алюминия $\text{AlFe}_5\text{Si}_{10}$ ($\text{Al} + 5 \text{ мас. \% Fe} + 10 \text{ мас. \% Si}$) с оловом был получен в шахтной лабораторной печи сопротивления типа СШОЛ при температуре $750\text{--}800^\circ\text{C}$ путем добавления в расплав алюминия расчетного количества ингредиентов и олова марки 03 (98.49% Sn, ГОСТ 860-75). Полученные сплавы подвергались химическому анализу в Центральной заводской лаборатории Таджикской алюминиевой компании ГУП «ТАЛКо» (г. Турсунзаде, Республика Таджикистан). Взвешиванием контролировались массы шихты и полученных сплавов. В случае отклонения массы сплавов более чем на 2% (отн.) синтез сплавов проводился заново.

Из полученных таким образом расплавов в металлический кокиль отливались цилиндрические образцы диаметром 16 мм и длиной 30 мм заданной формы для исследования теплоемкости.

Один из методов определения теплоемкости материалов заключается в сравнении кривых

охлаждения двух образцов, один из которых является эталоном с известной теплоемкостью [18].

Физические основы предлагаемого метода измерения состоят в следующем. Механизм теплопередачи образцов при охлаждении обусловлен теплопроводностью окружающей среды, конвекцией и излучением. Для первых двух процессов (теплопроводности среды и конвекции) считается, что тепловой поток J от нагретого тела пропорционален разности между температурой поверхности образца T и температурой окружающей среды T_0 (закон Ньютона–Рихмана):

$$J = \alpha(T - T_0).$$

Коэффициент теплопередачи α зависит от большого количества параметров, и для него невозможно дать общую формулу. Поэтому на практике коэффициент теплоотдачи определяется экспериментально.

Температура при охлаждении тела спадает по экспоненте, если теплоемкость и коэффициент теплопередачи постоянны, а окружающая среда бесконечна и однородна. Действительно, уравнение теплового баланса

$$dQ = -Jdt$$

здесь имеет вид

$$C_p^0 m dT = -\alpha(T - T_0)dt,$$

где C_p^0 — удельная теплоемкость тела; m — его масса. Решением данного уравнения является выражение

$$T(t) = (T - T_0)e^{-\frac{t}{\tau}} + T_0,$$

где T — начальная температура, $\tau = mc/(\alpha S)$ — время тепловой релаксации.

При условии выполнения всех вышеуказанных требований теплоемкость материала образца определяется из измеренного по термограмме параметра релаксации τ . Поскольку величина α неизвестна, параллельные измерения необходимо выполнять и с эталонным образцом с известной теплоемкостью и теми же размерами. При этом условия охлаждения должны быть идентичными. Допуская, что коэффициент α у обоих образцов одинаков, теплоемкость измеряемого материала можно найти по формуле

$$C_x^0 = C_9^0 \frac{m_9 \tau_x}{m_x \tau_9},$$

где C_9^0 — теплоемкость эталонного материала; m_x , m_9 — массы исследуемого и эталонного образцов;

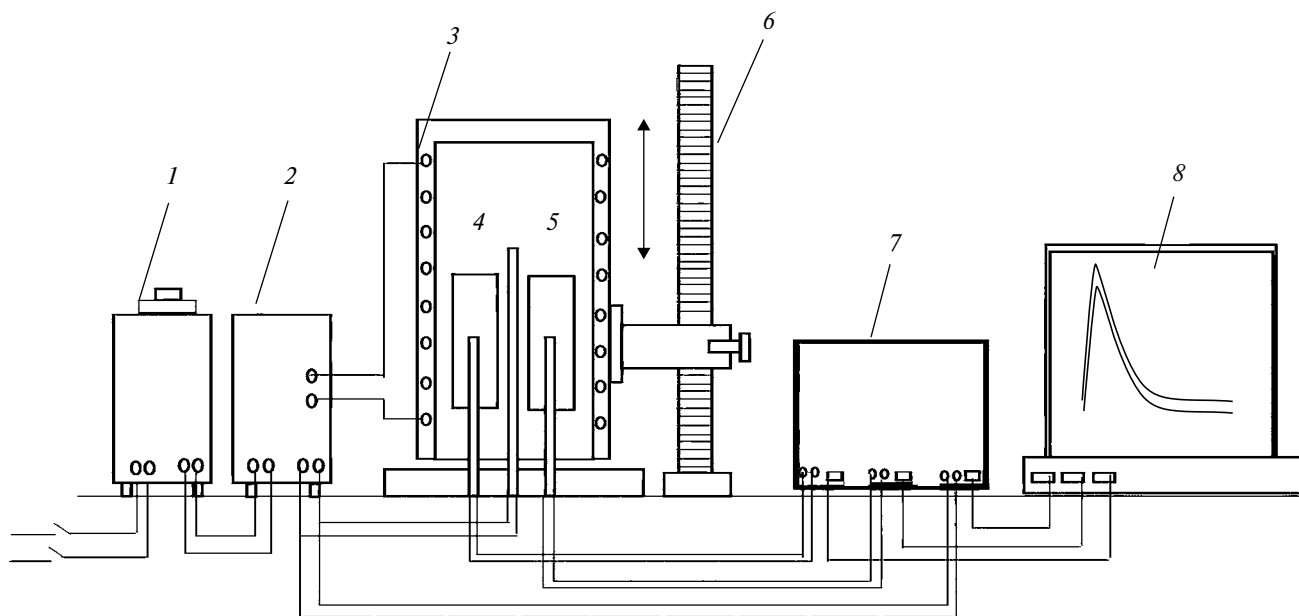


Рис. 1. Схема установки для определения теплоемкости твердых тел в режиме охлаждения.

τ_x, τ_y – измеренное время тепловой релаксации для этих образцов:

$$\tau_y = (dT/dt)_1, \tau_x = (dT/dt)_2.$$

Данный метод допускает:

- постоянство C_x, C_y и α при изменении температуры;
- охлаждение в бесконечной среде;
- температуры образцов, при которых излучением можно пренебречь по сравнению с теплопроводностью и конвекцией.

Разбив термограмму на узкие интервалы температур, в которых теплоемкости и коэффициент α предполагаются постоянными, можно определить зависимости C_x, C_y от температуры. При этом для каждого температурного интервала находятся свои параметры тепловой релаксации $\tau_x(T)$ и $\tau_y(T)$, которые и используются для расчета $C_x(T)$ [19].

В данной работе определены средние теплоемкости по всему измеряемому интервалу температур. Для всех образцов коэффициенты теплопередачи α предполагаются одинаковыми.

Далее строятся кривые охлаждения эталона и исследуемых образцов, которые используются для определения скоростей охлаждения. Кривая охлаждения, т.е. термограмма, представляет собой зависимость температуры образца от времени при его охлаждении в неподвижном воздухе.

Измерение теплоемкости проводилось по методике, описанной в работах [20–23]. Схема установки представлена на рис. 1. Она включает в себя

электропечь 3, которая смонтирована на стойке 6 и может перемещаться вверх и вниз (стрелкой показано направление перемещения). Образец 4 и эталон 5 (которые тоже могут перемещаться). С одного конца образцов высверлены каналы, в которые вставляются термопары. К цифровым многоканальным термометрам 7, подсоединенным к компьютеру 8, подведены концы термопар.

Теплоемкость сплава алюминия AlFe5Si10 с оловом измерялась в режиме охлаждения. В качестве эталона использовалась медь особой степени чистоты марки М00 (99.999% Cu), полученная зонной очисткой. Построение графиков и обработка результатов измерений производилась с помощью программ MS Excel и SigmaPlot. Величина коэффициента корреляции составила $R_{\text{корр}} = 0.998$. Временной интервал фиксации температуры выбран равным 10 с. Относительная погрешность измерения температуры в интервале от 40 до 400°C составляла $\pm 1\%$, при более высоких температурах ($>400^\circ\text{C}$) – $\pm 2.5\%$. В данной работе погрешность измерения теплоемкости не превышала 1%.

Предварительно для определения погрешности метода измерялась теплоемкость меди марки М00 по отношению к алюминию марки А7 и наоборот. Результаты измерения для трех параллельных экспериментов представлены в табл. 1, 2. Установленное значение погрешности измерений теплоемкости меди марки М00 не превышает 1%. Далее в качестве эталона взята медь марки М00. С этой точки зрения именно медь является более надежным металлом, поскольку она характеризуется более высокой температурой плавления и достоверными

Таблица 1. Экспериментальные значения скоростей охлаждения ($dT/d\tau$, К/с) образцов из меди марки М00 и эталона (А1 марки А7)

T , К	Cu марки М00			Эталон (А1 марки А7)		
	первое измерение	второе измерение	третье измерение	первое измерение	второе измерение	третье измерение
300	0.0289	0.0063	0.0141	0.5911	0.0345	0.0442
400	0.2236	0.0728	0.1116	0.8817	0.0130	0.0124
500	0.3938	0.1852	0.2183	0.9975	0.0275	0.0262
600	0.5444	0.3443	0.3052	1.0033	0.0443	0.0896
700	0.6804	0.5512	0.3717	0.9639	0.0639	0.1956
800	0.8066	0.8069	0.4172	0.9441	0.0868	0.3628

Таблица 2. Теплоемкость (кДж/(кг К)) меди марки М00 и эталона (А1 марки А7)

T , К	Cu марки М00 по данным [24]	Cu марки М00			Эталон (А1 марки А7) по данным [25]
		первое измерение	второе измерение	третье измерение	
300	0.3850	0.3759	0.3699	0.3678	0.9032
400	0.3977	0.3883	0.3820	0.3800	0.9472
500	0.4080	0.3984	0.3919	0.3899	0.9879
600	0.4169	0.4070	0.4004	0.3984	1.0306
700	0.4251	0.4151	0.4083	0.4064	1.0803
800	0.4336	0.4234	0.4164	0.4146	1.1424

значениями теплоемкости, определенными многими авторами разными методами [24].

Сравнение экспериментально полученных значений теплоемкости меди по отношению к А1 марки А7 показывает почти 99%-ную сходимость с данными [24].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Экспериментально полученные кривые охлаждения образцов из сплава алюминия AlFe5Si10 с оловом представлены на рис. 2а. Термограммы $T=f(\tau)$ образцов из сплавов описываются уравнением вида

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

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

Дифференцируя (1) по τ , получаем уравнение, с помощью которого можно определить скорости охлаждения образцов из сплавов:

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

Экспериментально полученные термограммы (рис. 2а) и графики скорости охлаждения образцов из сплавов (рис. 2б) описываются полиномами (1), (2). Компьютерная обработка уравнения (2) позволила установить значения коэффициентов a , b , p , k (табл. 3) для исследованных сплавов.

С использованием рассчитанных значений скоростей охлаждения образцов по уравнению (2) вычислена удельная теплоемкость сплава алюминия AlFe5Si10 с оловом. Результаты расчета свидетельствуют о том, что температурные зависимости удельной теплоемкости сплавов и эталона (Cu марки М00) описываются уравнением вида

$$C_p^o = f + gT + cT^2 + dT^3. \quad (3)$$

Значения коэффициентов в уравнении температурной зависимости теплоемкости (3) для алюминиевого сплава AlFe5Si10 с оловом представлены в табл. 4.

В табл. 5 и на рис. 3а приведены результаты расчета температурных зависимостей удельной теплоемкости алюминиевого сплава AlFe5Si10 с оловом и эталона (Cu марки М00) с шагом 100 К.

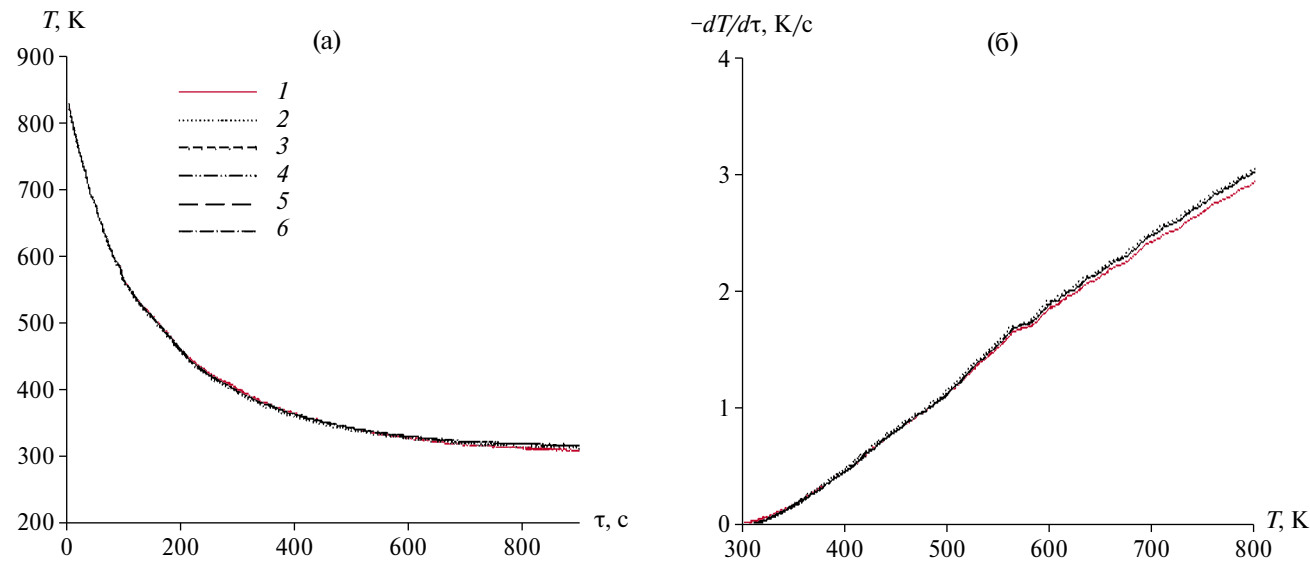


Рис. 2. Зависимости температуры от времени (а) и скорости охлаждения от температуры (б) образцов эталона (1) и алюминиевого сплава AlFe5Si10 с оловом: 2 – AlFe5Si10, 3 – AlFe5Si10 + 0.05% Sn, 4 – 0.1%, 5 – 0.5%, 6 – 1.0%.

Таблица 3. Значения коэффициентов a, b, p, k в уравнении (2) для алюминиевого сплава AlFe5Si10 с оловом и эталона (Cu марки M00)

Содержание олова в сплаве, мас. %	a, K	$b \times 10^{-3}, c^{-1}$	p, K	$k \times 10^{-5}, c^{-1}$
0.0	488.57	6.64	309.43	5.30
0.05	485.38	6.64	332.15	4.91
0.1	485.38	6.64	331.25	4.91
0.5	485.38	6.64	331.85	4.91
1.0	485.38	6.64	331.05	4.91
Эталон	481.34	6.48	329.32	8.12

Видно, что в исследованном температурном интервале с ростом температуры теплоемкость сплава AlFe5Si10, легированного оловом, растет, а с увеличением содержания олова уменьшается.

Используя вычисленные данные по теплоемкости сплава AlFe5Si10 с оловом и экспериментально полученные скорости охлаждения образцов, можно рассчитать коэффициент теплоотдачи для сплава AlFe5Si10 с оловом и эталона по следующей формуле

$$\alpha = \frac{C_p^o m \frac{dT}{d\tau}}{(T - T_0) S}.$$

Для сплава AlFe5Si10 с оловом температурная зависимость коэффициента теплоотдачи представлена на рис. 3б. С ростом температуры коэффициент теплоотдачи увеличивается, а с увеличением содержания олова в сплаве – уменьшается.

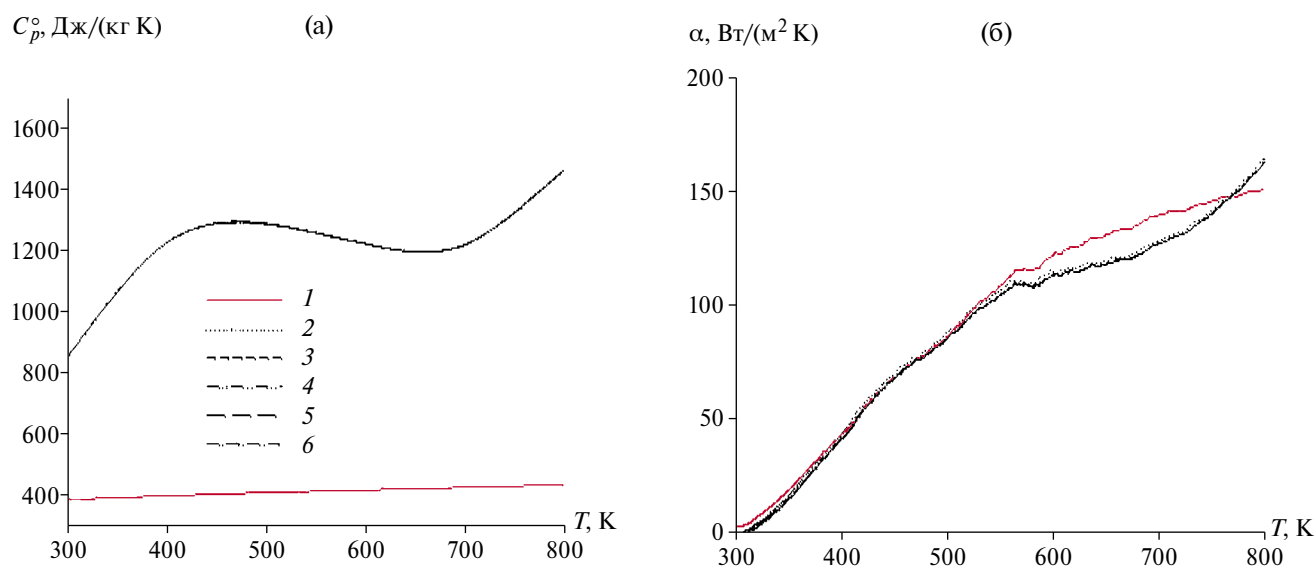
Для расчета температурных зависимостей изменений энтальпии, энтропии и энергии Гиббса для сплава AlFe5Si10, легированного оловом, используются интегралы от удельной теплоемкости по уравнению (3):

$$\begin{aligned} H^0(T) - H^0(T_0) &= a(T - T_0) + \frac{b}{2}(T^2 - T_0^2) + \\ &+ \frac{c}{3}(T^3 - T_0^3) + \frac{d}{4}(T^4 - T_0^4), \\ S^0(T) - S^0(T_0) &= a \ln \frac{T}{T_0} + b(T - T_0) + \\ &+ \frac{c}{2}(T^2 - T_0^2) + \frac{d}{3}(T^3 - T_0^3), \\ G^0(T) - G^0(T_0) &= \\ &= (H^0(T) - H^0(T_0)) - T(S^0(T) - S^0(T_0)). \end{aligned}$$

Результаты расчета термодинамических функций сплавов представлены в табл. 6. С ростом температуры энтальпия и энтропия увеличиваются, значение энергии Гиббса уменьшается. Указанные характеристики сплавов имеют обратную зависимость от содержания олова.

Таблица 4. Значения коэффициентов f , g , c , d в уравнении (3) для алюминиевого сплава AlFe5Si10 с оловом и эталона (Cu марки М00)

Содержание олова в сплаве, мас. %	f , Дж/(кг К)	g , Дж/(кг К ²)	$c \times 10^{-2}$, Дж/(кг К ³)	$d \times 10^{-5}$, Дж/(кг К ⁴)	Коэффициент корреляции $R_{\text{корр}}$
0.0	−4049.29	29.50	−5.33	3.13	0.999
0.05	−4049.31	29.50	−5.33	3.13	0.998
0.1	−4049.49	29.50	−5.33	3.13	0.998
0.5	−4048.32	29.49	−5.33	3.13	0.998
1.0	−4048.35	29.49	−5.33	3.13	0.998
Эталон	324.45	0.275	−0.03	0.01	1.00

**Рис. 3.** Температурные зависимости удельной теплоемкости (а) и коэффициента теплоотдачи (б) образцов: 1 – эталона, 2 – AlFe5Si10, 3 – AlFe5Si10 + 0.05% Sn, 4 – 0.1%, 5 – 0.5%, 6 – 1.0%.**Таблица 5.** Температурные зависимости удельной теплоемкости (Дж/(кг К)) сплава AlFe5Si10 с оловом и эталона (Cu марки М00)

Содержание олова в сплаве, мас. %	T , К					
	300	400	500	600	700	800
0.0	848.81	1225.91	1288.21	1223.51	1219.61	1464.31
0.05	848.78	1225.88	1288.18	1223.48	1219.58	1464.28
0.1	848.61	1225.71	1288.01	1223.31	1219.41	1464.11
0.5	848.58	1225.28	1287.18	1222.08	1217.78	1462.08
1.0	848.55	1225.25	1287.15	1222.05	1217.75	1462.05
Эталон	384.98	397.66	408.00	416.86	425.100	433.55

Таблица 6. Температурные зависимости изменений термодинамических функций сплава AlFe5Si10 с оловом и эталона (Cu марки M00)

Содержание олова в сплаве, мас. %	$H^0(T) - H^0(T_0^*)$, кДж/кг					
	300 K	400 K	500 K	600 K	700 K	800 K
0.0	1.56	108.70	236.25	362.11	482.98	614.32
0.05	1.56	108.70	236.24	362.10	482.97	614.31
0.1	1.56	108.68	236.21	362.05	482.90	614.22
0.5	1.56	108.66	236.12	361.86	482.57	613.71
1.0	1.56	108.66	236.12	361.85	482.55	613.69
Эталон	0.71	39.87	80.17	121.42	163.52	206.44
$S^0(T) - S^0(T_0^*)$, кДж/(кг K)						
0.0	0.005	0.31	0.59	0.83	1.01	1.19
0.05	0.005	0.31	0.59	0.83	1.01	1.19
0.1	0.005	0.31	0.59	0.83	1.01	1.19
0.5	0.005	0.31	0.59	0.82	1.01	1.18
1.0	0.005	0.31	0.59	0.82	1.01	1.18
Эталон	0.002	0.12	0.21	0.28	0.35	0.40
$G^0(T) - G^0(T_0^*)$, кДж/кг						
0.0	-0.005	-15.64	-61.35	-132.81	-224.86	-334.66
0.05	-0.005	-15.63	-61.35	-132.80	-224.86	-334.65
0.1	-0.005	-15.63	-61.35	-132.78	-224.82	-334.60
0.5	-0.005	-15.63	-61.33	-132.74	-224.73	-334.43
1.0	-0.005	-15.63	-61.32	-132.74	-224.72	-334.42
Эталон	-0.002	-6.11	-22.24	-46.59	-77.90	-115.31

Примечание. $T_0^* = 298.15$ K.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В режиме охлаждения по известной теплоемкости эталонного образца из меди марки M00 установлена температурная зависимость теплоемкости алюминиевого сплава AlFe5Si10 с оловом.
2. Определены полиномы, описывающие температурные зависимости теплоемкости и изменений термодинамических функций (энтальпия, энтропия, энергия Гиббса) сплава AlFe5Si10 с оловом в интервале температур 300–800 K.
3. Показано, что с ростом температуры теплоемкость, коэффициент теплоотдачи, энтальпия и энтропия сплавов увеличиваются, а энергия Гиббса уменьшается. В изученном концентрационном интервале (0.05–1.0 мас. %) добавки олова снижают теплоемкость, энтальпию и энтропию алюминиевого сплава и увеличивают энергию Гиббса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Белецкий В.М., Кривов Г.А.* Алюминиевые сплавы (состав, свойства, технология, применение). Киев: Комитех, 2005. 365 с.

2. *Луц А.Р., Суслина А.А.* Алюминий и его сплавы. Самара: Самарск. гос. техн. ун-т, 2013. 81 с.

3. *Умарова Т.М., Ганиев И.Н.* Коррозия двойных алюминиевых сплавов в нейтральных средах. Душанбе: Дониш, 2007. 258 с.

4. *Дриц М.Е.* Алюминиевые сплавы. Свойства, обработка, применение. М.: Металлургия, 1979. 679 с.

5. *Chen X.G.* Growth Mechanisms of Intermetallic Phases in DC Cast AA1XXX Alloys // Essential Readings in Light Metals. Cast Shop for Aluminum Production. 2013. V. 3. P. 460.

6. *Grange D.A.* Microstructure Control in Ingots of Aluminum Alloys with an Emphasis on Grain Refinement // Essential Readings in Light Metals.

- Cast Shop for Aluminum Production. 2013. V. 3. P. 354.
7. *Geoffrey K.S.* Fundamentals of Solidification in Aluminum Castings // *Int. J. Metalcasting*. 2014. V. 8. P. 7.
 8. *Бергман Г.А., Вейц И.В., Медведев В.А., Хачкуров Г.А., Юнгман В.С.* Термодинамические свойства индивидуальных веществ. М.: Наука, 1981. 472 с.
 9. *Исмаилов Н.Ш., Ибрагимов Х.А.* Разработка малолегированного алюминиевого сплава для электротехнических изделий // *Успехи современной науки*. 2017. Т. 1. № 6. С. 236.
 10. *Мальцев М.В.* Модифицирование структуры металлов и сплавов. М.: Metallurgy, 1984. 280 с.
 11. *Гуреева М.А., Овчинников В.В., Манакон И.Н.* Металловедение: макро- и микроструктуры литейных алюминиевых сплавов: учеб. пособ. М., 2019. 250 с.
 12. *Сетюков О.А.* Влияние железа и кремния на литейные свойства алюминиевых сплавов с марганцем // *Технология легких сплавов*. 2010. № 1. С. 32.
 13. *Stanford N., Atwell D., Beer A., Davies C., Barnett M.R.* Effect of Microalloying with Rare-earth Elements on the Texture of Extruded Magnesium-based Alloys // *Scripta Mater*. 2008. V. 59. № 7. P. 772.
 14. *Иброхимов Н.Ф., Ганиев И.Н., Одинаев Х.О.* Физикохимия сплава АМg2 с редкоземельными металлами. Душанбе: Тадж. техн. ун-т им. М.С. Осими, 2016. 153 с.
 15. *Иванцов Г.П.* Нагрев металла (теория и методы расчета). Свердловск; М.: Гос. науч.-техн. изд-во лит. по черной и цветной металлургии, 1948. 191 с.
 16. *Багницкий В.Е.* Обратные связи в физических явлениях. Германия: LAP Lambert Acad. Publ., 2014. 196 с.
 17. *Киров С.А., Козлов А.В., Салецкий А.М., Харабадзе Д.Э.* Измерение теплоемкости и теплоты плавления методом охлаждения: учеб. пособ. М.: ООП Физфак МГУ им. М.В. Ломоносова, 2012. 52 с.
 18. *Еремина Р.М., Скворцов А.И., Мутыгуллина А.А.* Экспериментальные задачи общего физического практикума по молекулярной физике и термодинамике. Процессы переноса. Жидкости и твердые тела. Казань: Казан. ун-т, 2015. 42 с.
 19. *Рогачев Н.М., Гусева С.И.* Определение удельной теплоемкости твердых тел: метод. указ. к лаб. работе № 1–23. Самара: Самарский. гос. аэрокосм. ун-т им. акад. С.П. Королева, 2012. 14 с.
 20. *Ганиев И.Н., Сафаров А.Г., Одинаев Ф.Р., Якубов У.Ш., Кабутов К.* Температурная зависимость теплоемкости и изменение термодинамических функций сплава АЖ4.5 с оловом // *Изв. вузов. Цветная металлургия*. 2019. № 1. С. 50.
 21. *Ганиев И.Н., Рашидов А.Р., Одиназова Х.О., Сафаров А.Г., Джайлоев Дж.Х.* Влияние добавок меди на теплоемкость и термодинамические функции алюминия марки А7Е // *Изв. вузов. Цветная металлургия*. 2020. № 3. С. 4.
 22. *Ганиев И.Н., Абдулаков А.П., Джайлоев Д.Х., Якубов У.Ш., Сафаров А.Г., Абулхаев В.Д.* Влияние добавок висмута на теплофизические и термодинамические свойства алюминиевого проводникового сплава Е-АlMgSi (“алдрей”) // *Изв. вузов. Материалы электронной техники*. 2020. Т. 23. № 1. С. 86.
 23. *Ганиев И.Н., Назарова М.Т., Якубов У.Ш., Сафаров А.Г., Курбонова М.З.* Влияние лития на удельную теплоемкость и изменения термодинамических функций алюминиевого сплава АБ1 // *ТВТ*. 2020. Т. 58. № 1. С. 55.
 24. *Зиновьев В.И.* Теплофизические свойства металлов при высоких температурах. М.: Металлургия, 1989. 384 с.
 25. *Низомов З., Гулов Б.Н., Ганиев И.Н., Саидов Р.Х., Обидов Ф.У., Эшов Б.Б.* Исследование температурной зависимости удельной теплоемкости алюминия марок ОСЧ и А7 // *Докл. АН Республики Таджикистан*. 2011. Т. 54. № 1. С. 53.