



Научная статья
05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)
УДК 620.123
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.03.027

ВЛИЯНИЕ АЛЮМИНИЯ НА УДЕЛЬНУЮ ТЕПЛОЕМКОСТЬ И ИЗМЕНЕНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ ЦИНКА

Изатулло Наврузович Ганиев ¹, Сафаргул Саидхomidовна Содикова ²,
Умарали Шералиевич Якубов ³, Сурайё Джамшедовна Алихонова ⁴

^{1, 2, 3} Институт химии В.И. Никитина Национальной академии наук Таджикистана, Душанбе, Республика Таджикистан

¹ ganiev48@mail.ru

² ganiev48@mail.ru

³ yakubovumarali@gmail.com

⁴ Российско-Таджикский (Славянский) университет, Душанбе, Республика Таджикистан
thuraya86@inbox.ru

Аннотация. Теплоёмкость является важнейшей характеристикой веществ, и по её изменению от температуры можно определить тип фазового превращения, температуру Дебая, энергию образования вакансий, коэффициент электронной теплоёмкости и др. свойства. В настоящей работе теплоёмкость сплавов системы Zn–Al определялось в режиме «охлаждения», по известной теплоёмкости эталонного образца из гранулированного цинка марки ЦВ00. Для чего обработкой кривых охлаждения образцов из сплавов системы Zn–Al и эталона получены уравнения, описывающие их скорости охлаждения. Далее, по экспериментально найденным величинам скоростей охлаждения эталона и образцов из сплавов, зная их массы, установлены полиномы температурной зависимости теплоёмкости сплавов и эталона, которые описываются четырёхчленным уравнением. Используя интегралы от удельной теплоёмкости, вычислена температурная зависимость изменений энтальпии, энтропии и энергии Гиббса. Полученные зависимости показывают, что с ростом температуры теплоёмкость, коэффициент теплоотдачи, энтальпия и энтропия сплавов увеличиваются, а значения энергии Гиббса уменьшается. При этом добавки алюминия увеличивает теплоёмкость, энтальпию и энтропию цинка, величина энергии Гиббса при этом уменьшается.

Ключевые слова: цинк, алюминий, сплавы Zn–Al, режим «охлаждения», теплоёмкость, коэффициент теплоотдачи, энтальпия, энтропия, энергия Гиббса.

Для цитирования: Влияние алюминия на удельную теплоемкость и изменений термодинамических функций цинка / И. Н. Ганиев [и др.]. // Ползуновский вестник. 2021. № 3. С. 208–216. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.03.027.

Original article

INFLUENCE OF ALUMINUM ON SPECIFIC HEAT CAPACITY AND CHANGES IN THERMODYNAMIC FUNCTIONS OF ZINC

Izatullo N. Ganiev ¹, Safargul S. Sodikova ², Umarali Sh. Yakubov ³,
Surayo J. Alikhonova ⁴

Abstract. Heat capacity is the most important characteristic of substances, and from its change with temperature one can determine the type of phase transformation, Debye temperature, energy of vacancy formation, coefficient of electronic heat capacity, and other properties. In this work, the heat capacity of the alloys of the Zn-Al system was determined in the "cooling" mode, by the known heat capacity of the reference sample of granulated zinc of the CV00 grade. For this, by processing the cooling curves of samples from alloys of the Zn-Al system and the standard, equations are obtained that describe their cooling rates. Further, according to the experimentally found values of the cooling rates of the standard and samples from alloys, knowing their masses, polynomials are established for the temperature dependence of the heat capacity of the alloys and the standard, which are described by a four-term equation. Using integrals of specific heat capacity, the temperature dependence of changes in enthalpy, entropy, and Gibbs energy is calculated. The obtained dependences show that with an increase in temperature, the heat capacity, heat transfer coefficient, enthalpy and entropy of the alloys increase, while the Gibbs energy decreases. In this case, the addition of aluminum increases the heat capacity, enthalpy and entropy of zinc, while the value of the Gibbs energy decreases.

Keywords: zinc, aluminum, Zn-Al alloys, "cooling" mode, heat capacity, heat transfer coefficient, enthalpy, entropy, Gibbs energy.

For citation: Ganiev, I. N., Sodikova, S. S., Yakubov, U. Sh. & Alikhonova, S. J. (2021). Influence of aluminum on specific heat capacity and changes in thermodynamic functions of zinc. *Polzunovskiy vestnik*, (3), 208-216. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.03.027.

Причиной, определяющей «время жизни» сплавов, являются реакции их химических и электрохимических взаимодействий с компонентами окружающей среды. Потребность понимать и предсказывать эти реакции представляет огромный научный и практический интерес. Многообразие и сложность химических и электрохимических процессов, протекающих в многокомпонентных цинковых сплавах при контакте с окружающей средой, не позволяют говорить о законченной термодинамической и кинетической теории процессов.

В настоящее время примерно половина производимого цинка используется в качестве покрытий для защиты от коррозии стальных конструкций и изделий. В последнее время на рынке все чаще стали появляться стальные конструкции с гальфановыми покрытиями, представляющими собой сплавы цинка с 5 и 55 мас. % алюминия (Гальфан I и II соответственно), которые известны как перспективные составы в области оцинкования с точки зрения химико-физических характеристик [1–3].

Сплавы цинка с алюминием являются основой многих коррозионностойких сплавов и защитных покрытий. Дальнейшее повышение коррозионной стойкости гальфановых

покрытий достигается легированием третьим элементом. В частности, в работах [4–6] показано положительное влияние бериллия, магния и щелочноземельных металлов на коррозионную устойчивость данных сплавов. В указанных работах также сообщается об особенностях окисления цинк-алюминиевых сплавов Zn₅Al и Zn₅Al при высоких температурах кислородом газовой фазы.

В литературе нет сведений о влиянии добавок алюминия на теплоемкость и термодинамические функции цинка, хотя эти сведения играют определённую роль при подборе состава сплавов и оценке их работы в различных условиях.

В связи с этим была поставлена задача изучить температурную зависимость теплоемкости, коэффициента теплоотдачи и изменений термодинамических функций сплавов системы Zn–Al.

ТЕОРИЯ МЕТОДА И СХЕМА УСТАНОВКИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОЕМКОСТИ СПЛАВОВ

Существует много методов измерения теплоемкости твердых тел. В данной работе используется метод сравнения кривых охла-

ждения исследуемого образца с эталонным. Измеряемый образец, нагретый до температуры, превышающей температуру окружающей среды, будет охлаждаться. Скорость охлаждения зависит от теплоемкости материала образца. Сравнивая кривые охлаждения – термограммы (зависимости температуры от времени) двух образцов, один из которых служит эталоном с известной теплоемкостью, можно определить теплоемкость другого, т.е. неизвестного вещества.

Физические основы предлагаемого метода измерения состоят в следующем. Охлаждение образцов обусловлено тремя механизмами теплопередачи – теплопроводностью окружающей среды, конвекцией и излучением. Для первых двух процессов считается, что плотность теплового потока от нагретого тела J пропорционален разности между температурой поверхности образца T и температурой окружающей среды T_0 (закон Ньютона–Рихмана)

$$J = \alpha(T - T_0). \quad (1)$$

Коэффициент теплопередачи α зависит от большого количества параметров, и для него невозможно дать общую формулу. В связи с этим на практике коэффициент теплоотдачи определяется экспериментально. Тепловой поток за счет излучения имеет качественно иную зависимость от температуры (закон Стефана–Больцмана)

$$J = \sigma \varepsilon S (T^4 - T_0^4), \quad (2)$$

где $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8}$ Вт/м²·К⁴; ε – коэффициент поглощения; S – площадь поверхности тела. Лишь при небольшой разности температур $T - T_0$ он приближенно сводится к виду (1)

$$J = 4\sigma \varepsilon S T_0^3 (T - T_0). \quad (3)$$

Если учитывать излучение с поверхности тела в виде соотношения (3), то температура при охлаждении тела будет спадать по экспоненте. Действительно, уравнение теплового баланса

$$\delta Q = -J dt \quad (4)$$

здесь имеет вид

$$C_p^0 m \frac{dT}{dt} = -\alpha(T - T_0) ds, \quad (5)$$

где C_p^0 , α , m – удельная теплоемкость, коэффициент теплоотдачи и масса тела. Его решением является

$$T(t) = (T_1 - T_0) e^{-t/\tau} + T_0, \quad (6)$$

где T_1 – начальная температура; $\tau = mc/\alpha$ – время тепловой релаксации.

При условии выполнения всех указанных выше требований, теплоемкость материала образца определяется из измеренного по термограмме параметру релаксации τ . Ввиду того, что величина α не известна, измерения необходимо провести параллельно с эталонным образцом с известной теплоемкостью и тех же размеров. При этом условия охлаждения у них должны быть идентичными. Допуская, что коэффициент α у них одинаков, теплоемкость измеряемого материала c_x можно найти по формуле:

$$C_x^0 = C_y^0 \frac{m_y \tau_x}{m_x \tau_y}, \quad (7)$$

где C_y^0 – теплоемкость эталонного материала; m_x и m_y – массы исследуемого и эталонного; τ_x и τ_y – измеренное время тепловой релаксации для исследуемого образца и эталона, которые равны $\tau_y = \left(\frac{dT}{d\tau}\right)_1$ и

$$\tau_x = \left(\frac{dT}{d\tau}\right)_2.$$

Этот метод допускает: 1) постоянство c_x , c_y и α при изменении температуры; 2) охлаждение в бесконечной среде; 3) температуры образцов, при которых излучением можно пренебречь по сравнению с теплопроводностью и конвекцией. Несоблюдение какого-либо из указанных условий нарушает экспоненциальный ход кривой охлаждения [7, 8].

Разбив термограмму на узкие интервалы температур, в которых теплоемкости и коэффициент α можно считать постоянными, учет зависимости c_x и c_y от температуры можно выполнить. При этом для каждого интервала находят свои параметры тепловой релаксации $\tau_x(T)$ и $\tau_y(T)$, которые и используются для расчета $c_x(T)$.

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

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

ВЛИЯНИЕ АЛЮМИНИЯ НА УДЕЛЬНУЮ ТЕПЛОЕМКОСТЬ И ИЗМЕНЕНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ ЦИНКА

Схема установки для измерения теплоемкости сплавов представлена на рисунке 1. Электропечь 3 смонтирована на стойке 6, по которой она может перемещаться вверх и вниз (стрелкой показано направление перемещения). Образец 4 и эталон 5 (тоже могут перемещаться) представляют собой цилиндр длиной 30 мм и диаметром 16 мм с высверленными каналами с одного конца, в которые вставлены термопары. Концы термопар подведены к цифровому многоканальному термометру 7, 8, 9, который подсоединен к компьютеру 10.

Включаем электропечь через автотрансформатор 1, установив нужную темпе-

ратуру с помощью терморегулятора 2. По показаниям цифрового многоканального термометра отмечаем значение начальной температуры. Вдвигаем измеряемый образец и эталон в электропечь и нагреваем до нужной температуры, контролируя температуру по показаниям цифрового многоканального термометра на компьютере. Далее измеряемый образец и эталон одновременно выдвигаем из электропечи. С этого момента фиксируем снижение температуры и записываем показания цифрового термометра на компьютере через 10 с. Охлаждаем образец и эталон ниже 30 °С [9–12].

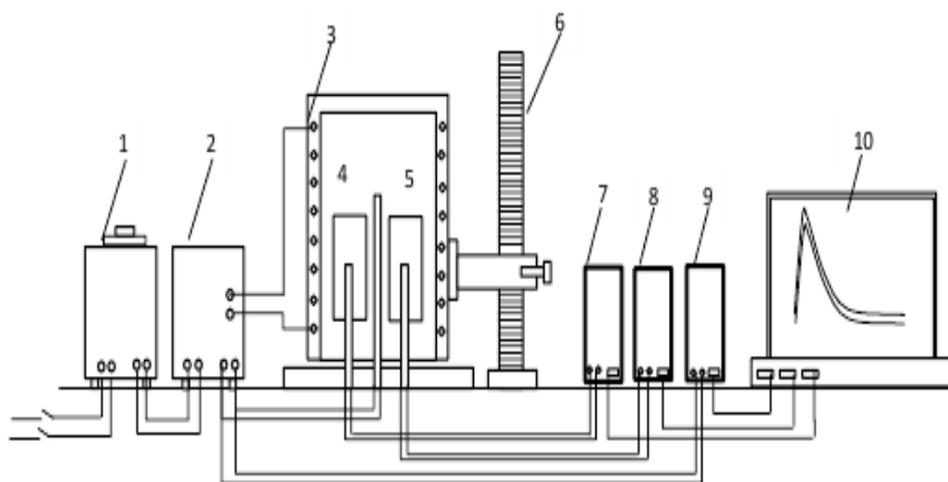


Рисунок 1 – Установка для определения теплоемкости твердых тел в режиме «охлаждения»

Figure 1 – Installation for determining the heat capacity of solids in the "cooling" mode

Для измерения температуры использовали многоканальный цифровой термометр, который позволял прямо фиксировать результаты измерений на компьютере в виде таблиц. Точность измерения температуры составляла 0,1 °С. Временной интервал фиксации температуры составлял 10 секунд. Относительная ошибка измерения температуры в интервале от 40 °С до 400 °С составляла $\pm 1\%$. Погрешность измерения теплоемкости по предлагаемой методике не превышает 4–6 % в зависимости от температуры. Обработка результатов измерений производилась с помощью программы MS Excel. Графики строились с помощью программы Sigma Plot. Подробная методика исследования теплоемкости сплавов представлена в работах [13–17].

Целью данной работы является определение удельной теплоемкости сплавов цинка с алюминием по известной удельной теплоемкости эталонного образца из гранулированного цинка марки ЦВ00.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для исследования теплоемкости сплавов системы Zn–Al их получали в шахтной печи сопротивления типа СШОЛ (сопротивление шахтное опытное лабораторное) в тиглях из оксида алюминия, в интервале температур 600–700 °С из гранулированного цинка марки ЦВ00 и алюминия марки А7. Из полученных сплавов в графитовую изложницу отливали цилиндрические образцы диаметром 16 мм и длиной 30 мм для исследования теплоемкости.

Сплавы цинка марки ЦВ00 с алюминием марки А7 подвергались химическому анализу на содержание основных компонентов в Центральной заводской лаборатории алюминиевой компании ГУП «ТалКо». 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.).

Экспериментально полученные кривые охлаждения образцов из сплавов цинка с алюминием представлены на рисунке 2, а и описываются уравнением вида

$$T = ae^{-bt} + pe^{-kt}, \quad (8)$$

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

Указанное уравнение нами получено математической обработкой кривых охлаждения образцов сплавов. Количество экспонентов (их два) в уравнении (8) нами выбрано исходя

из коэффициента корреляций, которое при двух экспоненциальных зависимостях равнялось не менее $R > 0,999$ %.

Дифференцируя (8) по t , получаем уравнение для определения скорости охлаждения сплавов

$$\frac{dT}{dt} = -abe^{-bt} - pke^{-kt}. \quad (9)$$

Значения коэффициентов a, b, p, k, ab, pk в уравнении (9) для исследованных сплавов приведены в таблице 1. Кривые зависимости скорости охлаждения от температуры для образцов из сплавов системы Zn–Al представлены на рисунке 2, б.

Таблица 1 – Значения коэффициентов в уравнении (9) для сплавов системы Zn–Al

Table 1 – Values of the coefficients of equation (9) for alloys of the Zn–Al system

Содержание алюминия в цинке, мас. %	a, K	b, c^{-1}	p, K	$k \cdot 10^{-5}, c^{-1}$	$a \cdot b, K \cdot c^{-1}$	$pk \cdot 10^{-2}, K \cdot c^{-1}$
Эталон (Zn марки ЦВ00)	209.3585	4.33	319.2681	4.3125	9.07	1.38
+0.1Al	207.2786	4.60	322.1181	4.7191	9.54	1.52
+1.0Al	207.2758	4.60	320.1210	4.7502	9.54	1.52
+2.0Al	207.2791	4.60	322.5175	4.7129	9.54	1.52
+4.0Al	207.2786	4.60	322.1181	4.7191	9.54	1.52

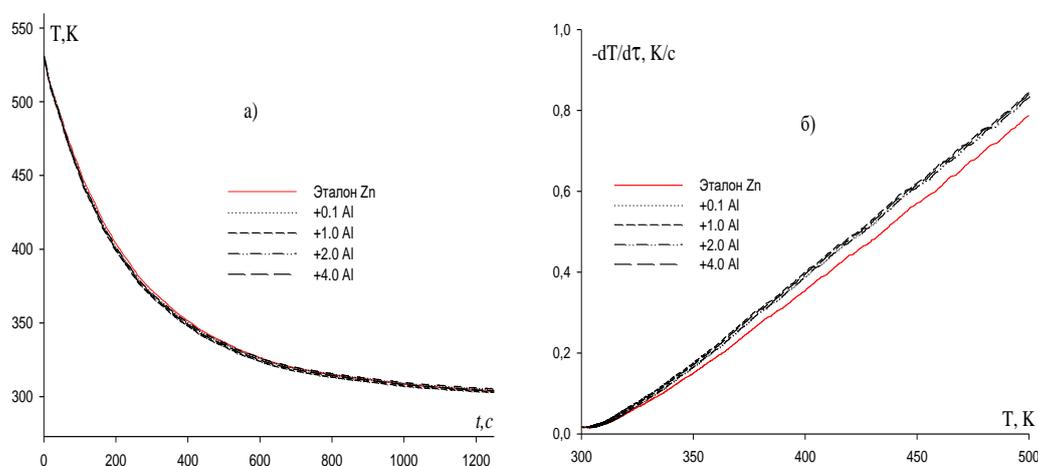


Рисунок 2 – График зависимости температуры от времени охлаждения (а) и скорости охлаждения от температуры (б) для образцов из сплавов системы Zn–Al

Figure 2 – Diagram of temperature versus cooling time (a) and cooling rate versus temperature (b) for samples from alloys of the Zn–Al system

Далее по рассчитанным значениям величин скоростей охлаждения образцов из сплавов по уравнению (7) была вычислена удельная теплоемкость сплавов цинка с алюминием. Получено следующее общее уравнение температурной зависимости удельной теплоемкости сплавов системы Zn–Al

$$C_p^0 = a + bT + cT^2 + dT^3 \quad (10)$$

Значения коэффициентов в уравнении (10) представлены в таблице 3.

Увеличение количества коэффициентов в уравнении (10) возможно, но его использование для расчета термодинамических функций усложняет оформление конечных результатов (с ростом количества коэффициентов в уравнениях (12)–(14) в таблице 5 после запятой значительно растёт количество цифр).

ВЛИЯНИЕ АЛЮМИНИЯ НА УДЕЛЬНУЮ ТЕПЛОЕМКОСТЬ И ИЗМЕНЕНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ ЦИНКА

Таблица 3 – Значения коэффициентов a , b , c , d в уравнении (10) для сплавов системы Zn–Al

Table 3 – Values of coefficients a , b , c , d in equation (10) for alloys of the Zn–Al system

Содержание алюминия в цинке, мас. %	a , Дж/кг·К	b , Дж/кг·К ²	$c \cdot 10^{-3}$, Дж/кг·К ³	$d \cdot 10^{-6}$, Дж/кг·К ⁴	Коэффициент корреляции R , %
Эталон (Zn марки ЦВ00)	335.60	0.2515	-0.35	0.35	1.0
+0.1Al	-199.82	4.0235	-8.9249	6.84	0.9986
+1.0Al	-189.39	3.9953	-8.8947	6.85	0.9986
+2.0Al	-194.05	4.0454	-8.9531	6.85	0.9986
+4.0Al	-205.88	4.2117	-9.3623	7.19	0.9986

Результаты расчета C_p^0 по формулам (7) и (10) через 50 К представлены в таблице 4 и на рисунке 3, а. Анализ зависимости изменений теплоемкости сплавов системы Zn–

Al от концентрации легирующей добавки в пределе изученной концентрации алюминия в цинке (0,1–4,0 мас. %) показал на увеличение теплоемкости сплавов системы Zn–Al.

Таблица 4 – Температурная зависимость удельной теплоемкости сплавов системы Zn–Al

Table 4 – Temperature dependence of the specific heat capacity of alloys of the Zn–Al system

Содержание алюминия в цинке, мас. %	T, К				
	300	350	400	450	500
Эталон (Zn марки ЦВ00)	389.00	395.76	402.60	409.79375	417.60
+0.1Al	389.11	408.97	420.138	427.748	436.928
+1.0Al	394.05	413.63	424.7318	432.47805	442.0118
+2.0Al	399.01	419.15	430.505	438.20625	447.395
+4.0Al	409.36	429.89	441.363	449.17675	458.723

Используя значения удельной теплоемкости сплавов цинка с алюминием и экспериментально полученные значения скорости охлаждения образцов, вычислили коэффициент теплоотдачи сплавов системы Zn–Al по уравнению

$$\alpha = \frac{C_p^0 m \frac{dT}{d\tau}}{(T - T_0)S}, \quad (11)$$

где T и T_0 – температуры образца и окружающей среды; S , m – площадь поверхности и масса образца, соответственно. Температурная зависимость коэффициента теплоотдачи для сплавов системы Zn–Al представлена на рисунке 3, б.

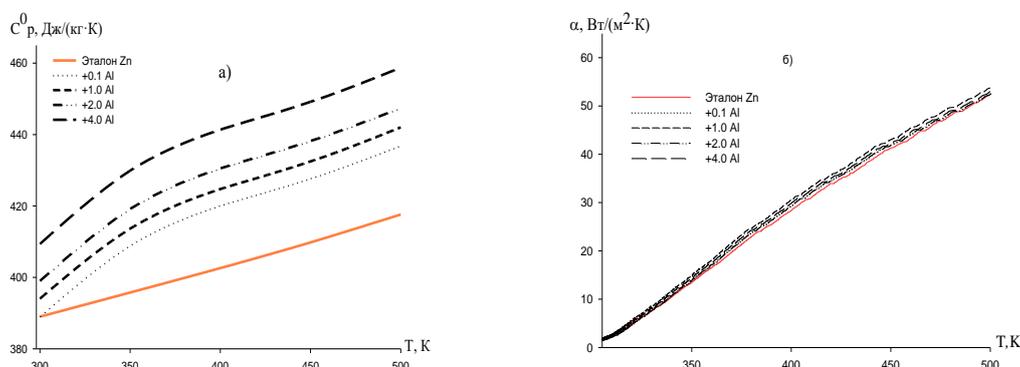


Рисунок 3 – Температурная зависимость удельной теплоемкости (а) и коэффициента теплоотдачи (б) сплавов системы Zn–Al

Figure 3 – Temperature dependence of specific heat (a) and coefficient heat transfer (b) alloys of the Zn–Al system

Таблица 5 – Температурная зависимость изменений термодинамических функций сплавов системы Zn–Al

Table 5 – Temperature dependence of changes in the thermodynamic functions of alloys of the Zn–Al system

Содержание алюминия в сплаве цинке, мас. %	Содержание алюминия в цинке, мас. %				
	Т.К				
	300	350	400	450	500
$[H^0(T) - H^0(T_0^*)]$, кДж/кг для сплавов					
Эталон (Zn марки ЦВ00)	0.719417	20.33851	40.2965	60.60434	81.28608
+0.1Al	0.718957	20.71775	41.47092	62.67222	84.27189
+1.0Al	0.728116	20.96637	41.95021	63.38371	85.22781
+2.0Al	0.737274	21.23881	42.50619	64.22848	86.35161
+4.0Al	0.756396	21.78666	43.59445	65.86196	88.5410
$[S^0(T) - S^0(T_0^*)]$, кДж/(кг·К) для сплавов					
Эталон (Zn марки ЦВ00)	0.002405	0.062878	0.116168	0.163998	0.207572
+0.1Al	0.002404	0.064021	0.119429	0.169363	0.21487
+1.0Al	0.002435	0.064791	0.120814	0.171296	0.217317
+2.0Al	0.002465	0.065632	0.122412	0.173574	0.220184
+4.0Al	0.002529	0.067325	0.125549	0.177994	0.225775
$[G^0(T) - G^0(T_0^*)]$, кДж/кг для сплавов					
Эталон (Zn марки ЦВ00)	-0,00223	-1,66881	-6,1708	-13,1949	-22,4999
+0.1Al	-0,00223	-1,68968	-6,30057	-13,5412	-23,1630
+1.0Al	-0,00225	-1,71036	-6,37551	-13,6993	-23,4306
+2.0Al	-0,00228	-1,73235	-6,45876	-13,8798	-23,7402
+4.0Al	-0,00234	-1,77714	-6,62502	-14,2355	-24,3466

* $T_0=298,15$ К

Для расчета температурной зависимости изменений энтальпии, энтропии и энергии Гиббса по (12)–(14) были использованы инте-

гралы от удельной теплоемкости по уравнению (10)

$$H^0(T) - H^0(T_0) = a(T - T_0) + \frac{b}{2}(T^2 - T_0^2) + \frac{c}{3}(T^3 - T_0^3) + \frac{d}{4}(T^4 - T_0^4); \quad (12)$$

$$S^0(T) - S^0(T_0) = a \ln \frac{T}{T_0} + b(T - T_0) + \frac{c}{2}(T^2 - T_0^2) + \frac{d}{3}(T^3 - T_0^3); \quad (13)$$

$$[G^0(T) - G^0(T_0)] = [H^0(T) - H^0(T_0)] - T[S^0(T) - S^0(T_0)], \quad (14)$$

где $T_0 = 298,15$.

Результаты расчета температурных зависимостей изменений энтальпии, энтропии и энергии Гиббса через 50 К представлены в таблице 5.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В режиме «охлаждения» по известной теплоемкости эталонного образца из исходного цинка марки ЦВ00 установлена теплоемкость сплавов системы Zn–Al. Получены математические модели, описывающие температурную зависимость теплоемкости и изменений термодинамических функций (энтальпия, энтропия,

энергия Гиббса) сплавов в интервале температур 300–500 К. С помощью полученных полиномиальных зависимостей показано, что с ростом температуры теплоемкость, энтальпия и энтропия сплавов увеличиваются, а значения энергии Гиббса уменьшается. Добавки алюминия в изученном концентрационном интервале (0.1–4,0 мас. %) увеличивает теплоемкость, энтальпию и энтропию алюминия. При этом значение энергии Гиббса уменьшается. Изменение теплоемкости цинка при его легировании алюминием объясняется тем, что добавка изменяет форму и характер кристаллизаций твердого раствора цинка в сплавах.

ВЛИЯНИЕ АЛЮМИНИЯ НА УДЕЛЬНУЮ ТЕПЛОЕМКОСТЬ И ИЗМЕНЕНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ ЦИНКА

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Conceição A.M., Dutra E.N., Codaro R.Z., Nakazato. Electrochemical Behavior and Corrosion Study of Electrodeposits of Zn and Zn-Fe-Co on Steel // *Materials Sciences and Applications*. 2012. Vol. 3. Iss. 6. P. 348.

2. Myeong H.L., Yeon W.K., Kyung M.L., Seung H.L., Kyung M.M. Electrochemical evaluation of zinc and magnesium alloy coatings deposited on electro-galvanized steel by PVD // *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*. 2013. № 23. P. 876–880.

3. Алиев Дж.Н., Обидов З.Р., Ганиев И.Н. Цинк-алюминиевые защитные покрытия нового поколения. Физико-химические свойства цинк-алюминиевых сплавов с щелочноземельными металлами. Германия : Издательский дом LAP LAMBERT Academic Publishing. 2013. С. 35–68.

4. Обидов З.Р., Ганиев И.Н. Физикохимия цинк-алюминиевых сплавов с редкоземельными металлами. Душанбе : «Андалеб Р». 2015. С. 319–320.

5. Кечин В.А., Люблинский Е.Я. Цинковые сплавы. М. : Металлургия, 1986. С. 210–224.

6. Amini R.N., Obidov Z.R., Ganiev I.N., Mo-hamad R.B. Potentiodynamical research of Zn–Al–Mg alloy system in the neutral ambience of NaCl electrolyte and influence of Mg on the structure // *Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology*. 2012. Vol. 2. № 2. P. 110–114.

7. Киров С.А., Салецкий А.М., Харабадзе Д.Э. Изучение явлений переноса в воздухе. Описание задачи № 219 общего физического практикума "Молекулярная физика". М. : ООП Физ. фак-та МГУ, 2013. 22 с.

8. Булкин П.С., Попова И.И. «Общий физический практикум. Молекулярная физика». М. : Изд-во МГУ, 1988. 215 с.

9. 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 // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2020. № 1. P. 17–24.

10. Ганиев И.Н., Норова М.Т., Эшов Б.Б., Иброхимов Н.Ф., Иброхимов С.Ж. Влияние добавок скандия на температурную зависимость теплоёмкости и изменений термодинамических функций алюминиево-магниевого сплава // *Физика Металлов и Металловедение*. 2020. Т. 121. № 1. С. 25–31.

11. Ganiev I.N., Nazarova M.T., Yakubov U.Sh., Safarov A.G., Kurbonova M.Z. Influence of lithium on specific heat capacity and changes in the thermodynamic functions of aluminum alloy AB1 // *High Temperature*. 2020. Vol. 58. № 1. P. 58–63.

12. Ганиев И.Н., Шарипова Х.Я., Одиназода Х.О., Иброхимов Н.Ф., Ганиева Н.И. Теплофизические свойства и термодинамические функции алюминиево-магниевого сплава AMg2 с индием // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2019. Т. 17. № 4. С. 34–43.

13. Ганиев И.Н., Якубов У.Ш., Назарова М.Т., Курбонова М.З. Влияние добавок калия на температурную зависимость теплоёмкости и изменений

термодинамических функций алюминиевого сплава AB1 // *Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева*. 2019. Т. 75. № 4. С. 16–22.

14. Ганиев И.Н., Ниёзов О.Х., Муллоева Н.М., Эшов Б.Б., Новоженев В.А. Влияние добавок стронция и хлорид-иона на анодное поведение сплава ССуЗ // *Журнал «Ползуновский вестник» ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова*. – 2019. – № 2. С. 143–150.

15. Ганиев И.Н., Назарова М.Т., Курбонова М.З., Якубов У.Ш. Влияния натрия на удельную теплоёмкость и изменение термодинамических функций алюминиевого сплава AB1 // *Известия Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический институт)*. 2019. № 51 (77). С. 25–30.

16. Ниёзов О.Х., Ганиев И.Н., Сафаров А.Г., Муллоева Н.М., Якубов У.Ш. Температурная зависимость теплоёмкости и изменение термодинамических функций свинцового сплава ССуЗ с кальцием // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Металлургия»*. 2019. Т. 19. № 3. С. 33–43.

17. Ganiev I.N., Safarov A.G., Odinaev F.R., Yakubov U.Sh., Kabutov K. Temperature dependence of heat capacity and the variation in thermodynamic function of the AZh 4.5 alloy doped with tin // *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2019. Vol. 60. № 2. P. 139–145.

Информация об авторах

И. Н. Ганиев – д.х.н., профессор, академик НАНТ, зав. лабораторией Института химии В.И. Никитина Национальной академии наук Таджикистана.

С. С. Содикова – PhD-докторанта Института химии В.И. Никитина Национальной академии наук Таджикистана.

У. Ш. Якубов – ст. научный сотрудник Института химии В.И. Никитина Национальной академии наук Таджикистана.

С. Дж. Алихонова – к.х.н., ст. преподаватель кафедры «Химия и биология» Российско-Таджикского (Славянского) университета.

REFERENCES

1. Conceição A.M., Dutra, E.N., Codaro, R.Z., Nakazato. (2012). Electrochemical Behavior and Corrosion Study of Electrodeposits of Zn and Zn-Fe-Co on Steel. *Materials Sciences and Applications*, 3(6), 348.

2. Myeong, H.L., Yeon, W.K., Kyung, M.L., Seung, H.L. & Kyung, M.M. (2013). Electrochemical evaluation of zinc and magnesium alloy coatings deposited on electro-galvanized steel by PVD. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*. (23). P. 876-880.

3. Aliev, J.N., Obidov, Z.R. & Ganiev, I.N. (2013). New generation zinc-aluminum protective coatings. Physicochemical properties of zinc-aluminum alloys with alkaline earth metals. Germany: Publishing house LAP LAM-BERT Academic Publishing. S. 35-68.
4. Obidov, Z.R. & Ganiev, I.N. (2015). *Physico-chemistry of zinc-aluminum alloys with rare earth metals*. Dushanbe: "Andaleb R".
5. Kechin, V.A. & Lyublinsky, E.Ya. (1986). *Zinc alloys*. M. : Metallurgy. (In Russ.).
6. Amini, R.N., Obidov, Z.R., Ganiev, I.N. & Mo-hamad, R.B. (2012). Potentiodynamical research of Zn-Al-Mg alloy system in the neutral ambience of NaCl electrolyte and influence of Mg on the structure. *Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology*, 2(2), 110-114.
7. Kirov, S.A., Saletsky, A.M. & Kharabadze, D.E. (2013). *Study of transport phenomena in the air. Description of the problem No. 219 of the general physics workshop "Molecular Physics"*. M. : OOP Phys. Faculty of Moscow State University. (In Russ.).
8. Bulkin, P.S. & Popova, I.I. (1988). General physics workshop. Molecular physics. M. : Publishing house of Moscow State University. (In Russ.).
9. Ganiev, I.N., Safarov, A.G., Odinaev, F.R., Yakubov, U.Sh. & Kabutov, K. (2020). Temperature dependence of the specific heat and the changes in the thermodynamic functions of a bismuth-bearing AZh4.5 Alloy. *Russian Metallurgy (Metally)*, (1), 17-24.
10. Ganiev, I.N., Norova, M.T., Eshov, B.B., Ibrokhimov, N.F. & Ibrokhimov, S.Zh. (2020). Influence of scandium additions on temperature dependence of heat capacity and changes in thermodynamic functions of aluminum-magnesium alloys. *Physics of Metals and Metallovedenie*. 121(1), 25-31. (In Russ.).
11. Ganiev, I.N., Nazarova, M.T., Yakubov, U.Sh., Safarov, A.G., Kurbonova, M.Z. (2020). Influence of lithium on specific heat capacity and changes in the thermodynamic functions of aluminum alloy AB1. *High Temperature*. 58(1), 58-63. (In Russ.).
12. Ganiev, I.N., Sharipova, Kh.Ya., Odinazoda, Kh.O., Ibrokhimov, N.F. & Ganieva, N.I. (2019). Thermophysical properties and thermodynamic functions of the aluminum-magnesium alloy AMg2 with indium. *Bulletin of the Magnitogorsk State Technical University. G.I. Nosov*. 17(4), 34-43. (In Russ.).
13. Ganiev, I.N., Yakubov, U.Sh., Nazarova, M.T. & Kurbonova, M.Z. (2019). The effect of potassium additives on the temperature dependence of the heat capacity and changes in the thermodynamic functions of the AB1 aluminum alloy. *Vestnik Kazan State Technical University named after A.N. Tupolev*. 75(4), 16-22. (In Russ.).
14. Ganiev, I.N., Niyozov, O.Kh., Mulloeva, N.M., Eshov, B.B. & Novozhenov, V.A. (2019). *Polzunovskiy vestnik*, (2), 143-150. (In Russ.).
15. Ganiev, I.N., Nazarova, M.T., Kurbonova, M.Z., Yakubov, U.Sh. (2019). Influence of sodium on the specific heat and changes in the thermodynamic functions of the aluminum alloy AB1. *Izvestia Saint-Petersburg State Technological Institute (Technical Institute)*. 51 (77). 25-30. (In Russ.).
16. Niyozov, O.Kh., Ganiev, I.N., Safarov, A.G., Mulloeva, N.M. & Yakubov, U.Sh. (2019). Temperature dependence of heat capacity and change in thermodynamic functions of lead alloy SSUZ with calcium. *Bulletin of the South Ural State University. Metallurgy series*. 19(3), 33-43. (In Russ.).
17. Ganiev, I.N., Safarov, A.G., Odinaev, F.R., Yakubov, U.Sh., Kabutov, K. (2019). Temperature dependence of heat capacity and the variation in thermodynamic function of the AZh 4.5 alloy doped with tin. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 60(2), 139-145. (In Russ.).

Information about the authors

I. N. Ganiev – Doctor of Chemical Sciences, Professor, Academician of the National Academy of Science, head of laboratory of V.I. Nikitin Institute of Chemistry (National Academy of Sciences of Tajikistan).

S. S. Sodikova – PhD-doctoral student of V.I. Nikitin Institute of Chemistry (National Academy of Sciences of Tajikistan).

U. Sh. Yakubov – senior researcher at V.I. Nikitin Institute of Chemistry (National Academy of Sciences of Tajikistan).

S. J. Alikhonova – Ph.D., senior lecturer at the Department of Chemistry and Biology (Russian-Tajik (Slavonic) University).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 15.06.2021; одобрена после рецензирования 10.09.2021; принята к публикации 17.09.2021.

The article was received by the editorial board on 15 June 21; approved after editing on 10 Sep 21; accepted for publication on 17 Sep 21.