
ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение
Т. 22, № 4, 2020
Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

DOI: 10.15593/2224-9877/2020.4.02
УДК 669.2:669.715

И.Н. Ганиев¹, Дж.Н. Алиев², Ф.М. Аминов²

¹Институт химии им. В.И. Никитина Национальной академии наук Таджикистана,
Душанбе, Таджикистан

²Таджикский технический университет им. М.С. Осими, Душанбе, Таджикистан

**ВЛИЯНИЕ ЦИРКОНИЯ НА УДЕЛЬНУЮ ТЕПЛОЕМКОСТЬ И ИЗМЕНЕНИЕ
ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ ЦИНКОВОГО СПЛАВА ZN55AL**

Теплоемкость представляет собой одно из важнейших физических свойств твердых тел, характеризующее изменение состояния вещества с температурой. Изучение теплоемкости является одним из основных методов исследования структурных и фазовых превращений в сплавах. Из температурной зависимости теплоемкости можно определить другие физические характеристики твердого тела: температуру и тип фазового превращения, температуру Дебая, энергию образования вакансий, коэффициент электронной теплоемкости и др.

Экспериментальное измерение теплоемкости для разных интервалов температур – от предельно низких до высоких – является основным методом определения термодинамических свойств веществ.

Теплоемкость цинкового сплава Zn55Al с цирконием определялась в режиме охлаждения по известной теплоемкости эталонного образца из меди. Для чего обработкой кривых скорости охлаждения образцов из цинкового сплава Zn55Al с цирконием и эталона получены полиномы, описывающие их скорости охлаждения. Далее по экспериментально найденным величинам скоростей охлаждения образцов из сплавов и эталона, при известных значениях их массы, были установлены полиномы температурной зависимости теплоемкости сплавов, которые описываются четырехчленным уравнением. С использованием интегралов от удельной теплоемкости были установлены модели температурной зависимости изменений энтальпии, энтропии и энергии Гиббса.

Полученные зависимости показывают, что с ростом температуры теплоемкость, энтальпия и энтропия сплавов увеличиваются, а значения энергии Гиббса уменьшаются. При этом добавки циркония увеличивают теплоемкость, энтальпию и энтропию исходного сплава Zn55Al до температуры 350 К, далее добавка уменьшает теплоемкость. Величина энергии Гиббса при этом уменьшается.

Ключевые слова: цинковый сплав Zn55Al, цирконий, эталон, режим охлаждения, теплоемкость, коэффициент теплоотдачи, изменение термодинамических функций, энтальпия, энтропия, энергия Гиббса.

I.N. Ganiev¹, J.N. Aliev², F.M. Aminov²

¹Institute of Chemistry named after V.I. Nikitin of the National Academy
of Sciences of Tajikistan, Dushanbe, Tajikistan

²Tajik Technical University named after M.S. Osimi,
Dushanbe, Tajikistan

**INFLUENCE OF ZIRCONIUM ON SPECIFIC HEAT CAPACITY AND CHANGES
IN THERMODYNAMIC FUNCTIONS ZINC ALLOY ZN55AL**

Heat capacity is one of the most important physical properties of solids, which characterizes the change in the state of matter with temperature. The study of heat capacity is one of the main methods for studying structural and phase transformations in alloys. From the temperature dependence of the heat capacity, it is possible to determine other physical characteristics of a solid: temperature and type of phase transformation, Debye temperature, vacancy formation energy, coefficient of electronic heat capacity, etc.

Experimental measurement of heat capacity for different temperature ranges – from extremely low to high – is the main method for determining the thermodynamic properties of substances.

In this work, the heat capacity of the zinc alloy Zn55Al with zirconium was determined in the "cooling" mode from the known heat capacity of a reference copper sample. For this, polynomials describing their cooling rates were obtained by processing the curves of the cooling rate of samples made of zinc alloy Zn55Al with zirconium and the standard. Further, according to the experimentally found values of the cooling rates of the samples from the alloys and the standard, knowing their masses, the polynomials of the temperature dependence of the heat capacity of the alloys were established, which are described by a four-term equation. Using integrals of specific heat capacity, models of the temperature dependence of changes in enthalpy, entropy and Gibbs energy were established.

The obtained dependences show that with an increase in temperature, the heat capacity, enthalpy, and entropy of alloys increase, while the Gibbs energy decreases. At the same time, zirconium additives increase the heat capacity, enthalpy and entropy of the initial Zn55Al alloy up to a temperature of 350K, then the additive decreases the heat capacity. In this case, the value of the Gibbs energy decreases.

Keywords: zinc alloy Zn55Al, zirconium, standard, "cooling" mode, heat capacity, heat transfer coefficient, changes in thermodynamic functions, enthalpy, entropy, Gibbs energy.

Введение

Наряду с известными областями и масштабами использования нелегированного цинка, сплавы на его основе также находят широкое применение в различных отраслях народного хозяйства, как в качестве конструкционного материала, так и в качестве неконструкционного [1, 2].

В качестве конструкционного материала цинковые сплавы главным образом применяются в приборостроении, полиграфической и авиационной промышленности, автомобилестроении, судостроении, для изготовления предметов домашнего обихода. В качестве неконструкционного материала цинковые сплавы применяются для литья анодов-протекторов, изготовления припоев в производстве подшипников и гальванических элементов, как покрытия стальных листов [3–5].

Цинковые сплавы применяются практически во всех отраслях промышленности и эксплуатируются в условиях воздействия как природных, так и искусственных сред. Как конструкционный материал нелегированный цинк не нашел широкого применения, так как обладает недостаточно благоприятным комплексом механических, физических и технологических свойств. Однако дополнительное легирование цинка различными элементами существенно повышает вышеуказанные свойства и характеристики [6, 7].

В литературе отсутствуют сведения о влиянии циркония на теплофизические свойства и термодинамические функции цинково-алюминиевых сплавов.

Целью данной работы является экспериментальное определение удельной теплоемкости и с ее помощью изменение термодинамических функций цинкового сплава Zn55Al с цирконием по известной удельной теплоемкости эталонного образца из меди с использованием скорости охлаждения образцов.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Сплавы для исследования были получены в шахтной печи электрического сопротивления СШОЛ в интервале температур 650–700 °С из цинка марки Ц1 (ГОСТ 3640–94), алюминия марки А7 (ГОСТ 11069–2001) и его лигатуры с цирконием. Лигатура алюминия с цирконием (2%Zr) предварительно синтезировалась в вакуумной печи под давлением инертного газа. Содержание циркония в сплаве Zn55Al составляло, мас. %: 0,01; 0,05; 0,1; 0,5. Взвешивание шихты производили на аналитических весах АРВ-200 с точностью $0,1 \cdot 10^{-6}$ кг. Шихтовка сплавов проводилась с учетом угара металлов. Разогревая печь электрического сопротивления СШОЛ до 700 °С, расплавляли алюминий

и цинк, затем вводили лигатуру алюминия с цирконием. После определенной выдержки при указанной температуре до 30 мин тщательно перемешивали расплав, снимали шлак. Из полученного расплава в графитовую изложницу отливали образцы диаметром 16 мм и длиной 30 мм.

Состав полученных сплавов выборочно контролировался химическим анализом, а также взвешиванием шихты и образцов до и после сплавления. В дальнейшем исследованию подвергались сплавы, у которых разница в массе до и после сплавления не превышала 2 отн. %.

Теплоемкость цинкового сплава Zn55Al с цирконием измеряли в режиме охлаждения по методикам, описанным в работах [8–16].

Для определения скорости охлаждения строили кривые охлаждения образцов. Кривые охлаждения представляют собой зависимость температуры образца от времени при охлаждении его на воздухе.

Передача тепла от более нагретого тела к менее нагретому – процесс, стремящийся к установлению термодинамического равновесия в системе, состоящей из огромного числа частиц, т.е. это релаксационный процесс, который можно описать во времени экспонентой. В нашем случае нагретое тело передает свое тепло окружающей среде, т.е. телу с бесконечно большой теплоемкостью. Исходя из этого, температуру окружающей среды можно считать постоянной (T_0).

Тогда закон изменения температуры тела от времени τ можно записать в виде

$$\Delta T = \Delta T_1 e^{-\tau/\tau_1},$$

где ΔT – разность температур нагретого тела и окружающей среды; ΔT_1 – разность температур нагретого тела и окружающей среды при $\tau = 0$; τ_1 – постоянная охлаждения, численно равная времени, в течение которого разность температур между нагретым телом и окружающей средой уменьшается в e раз.

Измерение теплоемкости проводилось на установке, схема которой представлена на рис. 1.

Электропечь 3 смонтирована на стойке 6, по которой она может перемещаться вверх и вниз (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 термодатчики 4 и 5. Концы термодатчиков 7, 8 и 9 подведены к цифровому термометру Digital Multimeter DI9208L. Электропечь запускается через лабораторный автотрансформатор (ЛАТР) 1 при установке нужной температуры с помощью терморегулятора 2. По показаниям цифровых термометров фиксируется значение начальной температуры.

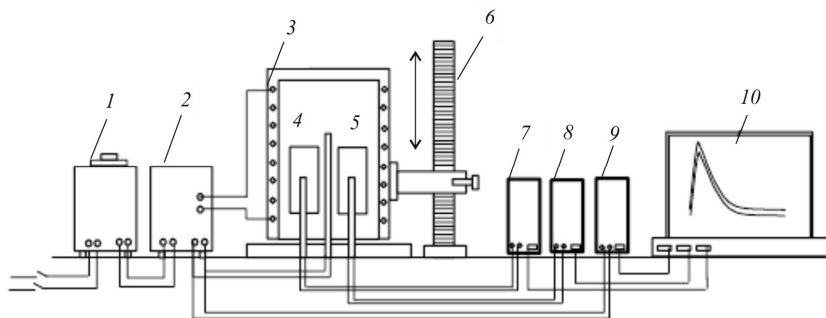


Рис. 1. Установка для определения теплоемкости твердых тел в режиме охлаждения

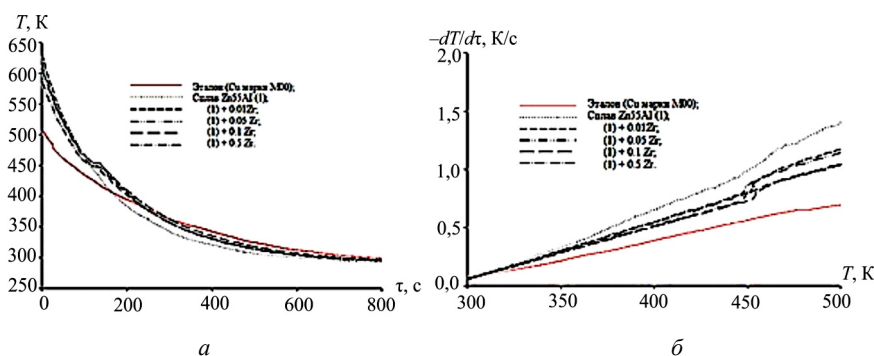


Рис. 2. Зависимости температуры от времени (а) и скорости охлаждения от температуры (б) для образцов из цинкового сплава Zn55Al с цирконием и эталона (Cu марки M00)

Вдвигаем образец и эталон в электропечь и нагреваем до нужной температуры, контролируя температуру по показаниям цифровых термометров на компьютере 10. Образец и эталон одновременно выдвигаем из электропечи и с этого момента фиксируем температуру. Записываем показания цифровых термометров на компьютер через каждые 10 с до охлаждения температуры образца и эталона до комнатной температуры.

Полученные зависимости температуры от времени охлаждения для образцов из сплавов (рис. 2, а) 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 уравнение (1) по τ , получим уравнение для скорости охлаждения образцов

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

По уравнению (2) нами были вычислены скорости охлаждения образцов из сплавов, которые представлены на рис. 2, б. Значения коэффициентов a, b, p, k, ab, pk в уравнении (2) для исследованных сплавов приведены в табл. 1.

Зависимость скорости охлаждения образцов из сплавов и эталона от температуры представлена на рис. 2.

Вычисление удельной теплоемкости сплавов проводилось по уравнению (3) с использованием значений скорости охлаждения образцов из сплавов $(dT/d\tau)_2$ и эталона $(dT/d\tau)_1$ и их масс:

$$C_{p_2}^0 = C_{p_1}^0 \frac{m_1}{m_2} \cdot \frac{\left(\frac{dT}{d\tau}\right)_1}{\left(\frac{dT}{d\tau}\right)_2}. \quad (3)$$

Результаты расчета теплоемкости сплавов в виде зависимости C_p^0 от температуры представлены в табл. 2 и на рис. 3, а, которые описываются уравнением вида

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

где a, b, c, d – эмпирические коэффициенты, экспериментально найденные для каждого сплава из опыта.

Значения коэффициентов a, b, c, d в уравнении (4) для исследованных сплавов представлены в табл. 3.

Используя вычисленные данные по теплоемкости цинкового сплава Zn55Al с цирконием и экспериментально полученные скорости охлаждения образцов, рассчитали коэффициент теплоотдачи $\alpha(T)$ для цинкового сплава Zn55Al с цирконием и эталона (Cu) по формуле

Таблица 1

Значения коэффициентов a, b, p, k, ab, pk в уравнении (2) для цинкового сплава Zn55Al с цирконием и эталона (Cu марки М00)

Содержание циркония в сплаве, мас. %	a, K	$b \cdot 10^{-3}, c^{-1}$	p, K	$k \cdot 10^{-5}, c^{-1}$	$ab, K \cdot c^{-1}$	$pk \cdot 10^{-2}, K \cdot c^{-1}$
Сплав Zn55Al	296,68	6,90	312,18	9,03	2,05	2,82
0,01	304,32	5,59	304,51	5,78	1,70	1,76
0,05	290,58	5,51	305,93	6,78	1,60	2,08
0,1	289,53	4,96	300,03	4,05	1,44	1,22
0,5	277,46	4,85	293,86	2,36	1,35	0,06
Эталон	210,52	3,35	286,01	0,62	0,7063	0,17

Таблица 2

Температурная зависимость удельной теплоемкости цинкового сплава Zn55Al с цирконием, Дж/(кг·К), и эталона (Cu марки М00) и сплава

Содержание циркония в сплаве Zn55Al, мас. %	T, K					Рост $C_p^0, \%$
	300	350	400	450	500	
Сплав Zn55Al	513,42	990,65	1396,08	1727,34	2074,19	303,9
0,01	645,87	1081,79	1366,05	1593,26	1867,93	189,2
0,05	682,94	1065,9	1335,75	1604,63	1804,67	164,2
0,1	690,15	1069,69	1290,68	1456,89	1646,27	138,1
0,5	682,75	1081,87	1293,55	1493,33	1630,36	138,3
Рост $C_p^0, \%$	32,98	9,20	-7,34	-13,54	-21,39	-
Эталон	384,98	391,67	397,66	403,03	407,99	-

Таблица 3

Значения коэффициентов a, b, c, d в уравнении (4) для образцов из цинкового сплава Zn55Al с цирконием и эталона (Cu марки М00)

Содержание циркония в сплаве, мас. %	$a, Дж/(кг \cdot K)$	$b, Дж/(кг \cdot K^2)$	$c \cdot 10^{-2}, Дж/(кг \cdot K^3)$	$d \cdot 10^{-6}, Дж/(кг \cdot K^4)$	Коэффициент корреляции R
Сплав Zn55Al	-1458,52	17,44	-6,52	-55,592	0,9925
0,01	-3452,20	19,99	-2,38	10,037	0,9984
0,05	-1424,04	6,59	-0,50	-10,675	0,9971
0,1	-4704,89	31,03	-5,31	32,779	0,9991
0,5	-7670,50	52,39	-10,29	70,441	0,9984
Эталон	324,45	0,27	-0,03	0,142	1,00

$$\alpha = \frac{C_p^0 m \left(\frac{dT}{d\tau} \right)_2}{(T - T_0) S'}$$

Из табл. 2 и рис. 3, a видно, что теплоемкость сплавов от температуры растет, а от содержания циркония до 350 К увеличивается, далее до 50 К уменьшается.

Результаты расчета температурной зависимости коэффициента теплоотдачи для сплава Zn55Al с цирконием приведены на рис. 3, б. От содержания циркония в сплаве α уменьшается, от температуры растет.

При вычислении температурной зависимости изменений энтальпии, энтропии, энергии Гиббса по уравнениям (5)–(7) были применены интегралы от удельной теплоемкости, Дж/(кг·К), по уравнению (4):

$$H^0(T) - H^0(T_0) = a(T - T_0) + \frac{b}{2}(T^2 - T_0^2) + \frac{c}{3}(T^3 - T_0^3) + \frac{d}{4}(T^4 - T_0^4); \quad (5)$$

$$S^0(T) - S^0(T_0) = a \ln \frac{T}{T_0} + b(T - T_0) + \frac{c}{2}(T^2 - T_0^2) + \frac{d}{3}(T^3 - T_0^3); \quad (6)$$

$$[G^0(T) - G^0(T_0)] = [H^0(T) - H^0(T_0)] - T[S^0(T) - S^0(T_0)], \quad (7)$$

где $T_0 = 298,15 K$.

Результаты расчетов изменения термодинамических функций цинкового сплава Zn55Al с цирконием обобщены в табл. 4.

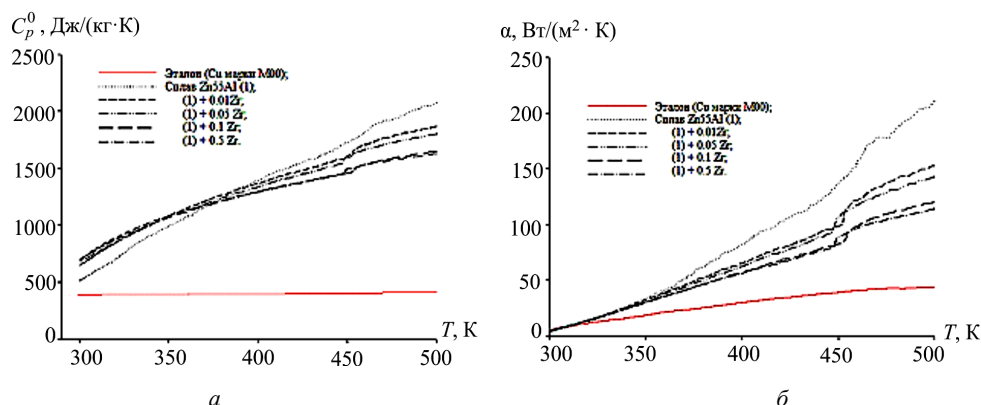


Рис. 3. Температурная зависимость удельной теплоемкости (а) и коэффициента теплоотдачи (б) цинкового сплава Zn55Al с цирконием и эталона (Cu марки M00)

Таблица 4

Температурная зависимость изменения термодинамических функций цинкового сплава Zn55Al с цирконием и эталона (Cu марки M00)

Содержание циркония в сплаве, мас. %	T, K				
	300	350	400	450	500
Сплав Zn55Al	$[H^0(T) - H^0(T_0^*)], \text{кДж/кг}$ для сплавов				
	1,0848	39,5869	97,326	174,964	271,080
0,01	1,2328	44,8590	106,040	181,639	268,894
0,05	1,1551	40,5196	94,617	161,707	239,645
0,1	1,3010	45,9378	105,46	175,823	254,203
0,5	1,5233	55,0045	127,12	212,348	307,806
Эталон	0,7120	20,1315	39,867	59,8881	80,1667
Сплав Zn55Al	$[S^0(T) - S^0(T_0)], \text{кДж/(кг} \cdot \text{K)}$ для сплавов				
	0,0036	0,1216	0,2752	0,4577	0,6599
0,01	0,0041	0,1378	0,3008	0,4785	0,6622
0,05	0,0044	0,1402	0,2992	0,4720	0,6510
0,1	0,0044	0,1413	0,2999	0,4654	0,6304
0,5	0,0042	0,1420	0,3040	0,4703	0,6330
Эталон	0,0024	0,0622	0,1149	0,1621	0,2048
Сплав Zn55Al	$[G^0(T) - G^0(T_0)], \text{кДж/кг}$ для сплавов				
	-0,0033	-2,9758	-12,7600	-30,9791	-58,8557
0,01	-0,0038	-3,3918	-14,2712	-33,7147	-62,2241
0,05	-0,1700	-8,5383	-25,0732	-50,6882	-85,8762
0,1	-0,0040	-3,5101	-14,4864	-33,6091	-61,0162
0,5	0,26254	5,2899	5,5240	0,7189	-87,0474
Эталон	-0,0022	-1,6518	-6,1071	-13,0534	-22,2427

Выводы

1. В режиме охлаждения по известной теплоемкости эталонного образца из меди установлены полиномы температурной зависимости теплоемкости цинкового сплава Zn55Al с цирконием. С помощью полученных полиномиальных зависимостей показано, что с ростом температуры теплоемкость, энтальпия и энтропия сплавов увеличиваются, а значения энергии Гиббса уменьшаются.

2. Добавки циркония в изученном концентрационном интервале (0,01–0,5 мас. %) незначитель-

но увеличивают теплоемкость исходного сплава до 350 K, далее уменьшают его значение.

3. Энтальпия и энтропия исходного сплава Zn55Al в зависимости от содержания циркония растут. При этом значения энергии Гиббса уменьшаются.

4. Рост теплоемкости, энтальпии и энтропии сплавов от концентрации циркония связан с его модифицирующим влиянием на микроструктуру цинково-алюминиевого твердого раствора в сплаве Zn55Al, что связано с изменением его внутреннего строения и увеличением степени гетерогенности структуры тройных сплавов [17–21].

Список литературы

1. Кечин В.А., Люблинский Е.Я. Цинковые сплавы. – М.: Металлургия, 1986. – 247 с.
2. Kiliñçeker G., Galip H. Electrochemical behaviour of zinc in chloride and acetate solutions // *Prot. Met. and Phys. Chem. Sur.* – 2009. – Vol. 45, no. 2. – P. 232–240.
3. Muller C., Sarret M., Benballa M. Some peculiarities in the codeposition of zinc–nickel alloys // *Electrochim. Acta.* – 2001. – No. 46 (18). – P. 2811–2817.
4. Rajappa S.K., Venkatesha T.V., Praveen B.M. Effect of an organic inhibitor on the electrical properties of high carbon steel in simulated acid environment // *Bull. Math. Science.* – 2008. – Vol. 31, no. 1. – P. 37–41.
5. Conceição A.M. Dutra, Eduardo N.C., Roberto Z.N. Electrochemical behavior and corrosion study of electrodeposits of Zn and Zn–Fe–Co on steel // *Math. Science, and Applic.* – 2012. – Vol. 3, no. 6. – P. 348–354.
6. 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: LAP LAMBERT Acad. Publ, 2013. – 130 с.
7. Обидов З.Р., Ганиев И.Н. Физикохимия цинк-алюминиевых сплавов с редкоземельными металлами. – Душанбе: Андалеб Р, 2015. – 334 с.
8. Иванцов Г.П. Нагрев металла (теория и методы расчета). – Свердловск; М.: Металлургиздат, 1948. – 192 с.
9. Киров С.А., Салецкий А.М., Харабадзе Д.Э. Изучение явлений переноса в воздухе. Описание задачи № 219 общего физического практикума «Молекулярная физика» физического факультета МГУ. – М., 2013. – 22 с.
10. Булкин П.С., Попова И.И. Общий физический практикум. Молекулярная физика. – М.: Изд-во МГУ, 1988. – 215 с.
11. Температурная зависимость теплоемкости и термодинамических функции сплава АЖ 4.5, легированного висмутом / И.Н. Ганиев, Ф.Р. Одинаев, А.Г. Сафаров, У.Ш. Якубов, К. Кабутов // *Металлы.* – 2020. – № 1. – С. 21–29.
12. Температурная зависимость теплоемкости и изменение термодинамических функций сплава АЖ4.5 с оловом / И.Н. Ганиев, А.Г. Сафаров, Ф.Р. Одинаев, У.Ш. Якубов, К. Кабутов // *Известия вузов. Цветная металлургия.* – 2019. – № 1. – С. 50–28.
13. Влияние стронция на теплоемкость и изменение термодинамических функции свинцового сплава ССу3 / И.Н. Ганиев, О.Х. Низов, А.Г. Сафаров, Н.М. Муллоева // *Известия СПбГТИ (ТУ).* – 2018. – № 47(73). – С. 36–42.
14. Влияние стронция на температурную зависимость удельной теплоемкости и изменение термодинамических функций сплава АЖ5К10 / У.Ш. Якубов, И.Н. Ганиев, М.М. Махмадизода, А.Г. Сафаров, Н.И. Ганиева // *Вестник СПГУТД. Сер. естественных наук.* – 2018. – № 3. – С. 61–67.
15. Температурная зависимость теплоемкости и изменение термодинамических функции сплава АКМ2, легированного стронцием / И.Н. Ганиев, С.Э. Отаджонов, Н.Ф. Иброхимов, М. Махмудов // *Известия вузов.*

Материалы электронной техники. – 2018. – Т. 21, № 1. – С. 35–42.

16. Влияние кальция на температурную зависимость удельной теплоемкости и изменение термодинамических функций алюминиевого сплава АЖ5К10 / И.Н. Ганиев, У.Ш. Якубов, М.М. Сангов, А.Г. Сафаров // *Вестник Казанского технологического университета.* – 2018. – Т. 21, № 8. – С. 11–15.

17. Температурная зависимость теплоемкости и термодинамических функций сплава АКМ2, легированного празеодимом и неодимом / И.Н. Ганиев, Х.Х. Низов, Б.Н. Гулов, З. Низомов, А.Э. Бердиев // *Вестник СибГИУ.* – 2017. – № 3. – С. 32–39.

18. Иброхимов Н.Ф., Ганиев И.Н., Ганиева Н.И. Влияние иттрия на теплофизические свойства сплава АМг2 // *Научный вестник Новосибирского государственного технического университета.* – 2017. – № 2 (67). – С. 177–187.

19. Effect of cerium on the thermophysical properties of AMg₂ alloy / N.F. Ibrokhimov, N.I. Ganieva, S.Z. Ibrokhimov, I.N. Ganiev, Z. Nizomov // *Physics of Metals and Metallography.* – 2016. – Vol. 117, no. 1. – P. 49–53.

20. Теплофизические свойства и термодинамические функции сплавов системы Pb–Sr / Н.М. Муллоева, И.Н. Ганиев, Б.Б. Эшов, Х.А. Махмадуллоев, З. Низомов // *Известия Самарского научного центра РАН.* – 2014. – Т. 6, № 6. – С. 38–42.

21. Влияние скандия на физико-химические свойства сплава АМг4 / С.Ж. Иброхимов, Б.Б. Эшов, И.Н. Ганиев, Н.Ф. Иброхимов // *Известия Самарского научного центра РАН.* – 2014. – Т. 16, № 4. – С. 256–260.

References

1. Kechin V.A., Liublinskii E.Ia. Tsinkovye splavy [Zinc Alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1986, 247 p.
2. Kiliñçeker G., Galip H. Electrochemical behaviour of zinc in chloride and acetate solutions. *Prot. Met. and Phys. Chem. Sur.*, 2009, vol. 45, no. 2, pp. 232–240.
3. Muller C., Sarret M., Benballa M. Some peculiarities in the codeposition of zinc–nickel alloys. *Electrochim. Acta.*, 2001, no. 46 (18), pp. 2811–2817.
4. Rajappa S.K., Venkatesha T.V., Praveen B.M. Effect of an organic inhibitor on the electrical properties of high carbon steel in simulated acid environment. *Bull. Math. Science*, 2008, vol. 31, no. 1, pp. 37–41.
5. Conceição A.M. Dutra, Eduardo N.C., Roberto Z.N. Electrochemical behavior and corrosion study of electrodeposits of Zn and Zn–Fe–Co on steel. *Math. Science, and Applic.*, 2012, vol. 3, no. 6, pp. 348–354.
6. Aliev Dzh.N., Obidov Z.R., Ganiev I.N. Tsink-aliuminievye zashchitnye pokrytiia novogo pokoleniia. Fiziko-khimicheskie svoistva tsink-aliuminievykh splavov s shchelochnozemel'nymi metallami [Zinc-aluminum protective coatings of new generation. Physical and chemical properties of zinc-aluminum alloys with alkali-earth metals]. Germaniia: LAP LAMBERT Acad. Publ, 2013, 130 p.
7. Obidov Z.R., Ganiev I.N. Fizikokhimiia tsink-aliuminievykh splavov s redkozemel'nymi metallami [Physicochemistry of zinc-aluminum alloys with rare earth metals]. Dushanbe: Andaleb R, 2015, 334 p.

8. Ivantsov G.P. Nagrev metalla (teoriia i metody rascheta) [Metal heating (theory and calculation methods)]. Sverdlovsk; Moscow: Metallurgizdat, 1948, 192 p.

9. Kirov S.A., Saletskii A.M., Kharabadze D.E. Izuchenie iavlenii perenosa v vozdukhie [Study of transport phenomena in the air]. Opisanie zadachi № 219 obshchego fizicheskogo praktikuma «Molekuliarnaia fizika» fizicheskogo fakul'teta MGU. Moscow, 2013, 22 p.

10. Bulkin P.S., Popova I.I. Obshchii fizicheskii praktikum. Molekuliarnaia fizika [General physical workshop. Molecular Physics]. Moscow: Izdatelstvo MGU, 1988, 215 p.

11. Ganiev I.N., Odinaev F.R., Safarov A.G., Iakubov U.Sh., Kabutov K. Temperaturnaia zavisimost' teploemkosti i termodinamicheskikh funktsii splava AZh 4.5, legirovanogo vismutom [Temperature dependence of heat capacity and thermodynamic function of AZh 4.5 alloy, alloyed bismuth]. *Metally*, 2020, no. 1, pp. 21–29.

12. Ganiev I.N., Safarov A.G., Odinaev F.R., Iakubov U.Sh., Kabutov K. Temperaturnaia zavisimost' teploemkosti i izmenenie termodinamicheskikh funktsii splava AZh4.5 s olovom [Temperature dependence of heat capacity and change of thermodynamic functions of AZh4.5 alloy with tin]. *Izvestiia vuzov. Tsvetnaia metallurgii*, 2019, no. 1, pp. 50–28.

13. Ganiev I.N., Niezov O.Kh., Safarov A.G., Mulloeva N.M. Vliianie strontsiia na teploemkost' i izmenenie termodinamicheskikh funktsii svintsovogo splava SSu3 [Effect of strontium on heat capacity and modification of thermodynamic function of SSu3 lead alloy]. *Izvestiia SPbGTI (TU)*, 2018, no. 47(73), pp. 36–42.

14. Iakubov U.Sh., Ganiev I.N., Makhmadizoda M.M., Safarov A.G., Ganieva N.I. Vliianie strontsiia na temperaturnuiu zavisimost' udel'noi teploemkosti i izmenenie termodinamicheskikh funktsii splava AZh5K10 [Strontium influence on temperature dependence of specific heat capacity and change of thermodynamic functions of AZh5K10 alloy]. *Vestnik SPGUTD. Ser. estestvennykh nauk*, 2018, no. 3, pp. 61–67.

15. Ganiev I.N., Otadzhonov S.E., Ibrokhimov N.F., Makhmudov M. Temperaturnaia zavisimost' teploemkosti i izmenenie termodinamicheskikh funktsii splava AKIM2, legirovannogo strontsiem [Temperature dependence of heat capacity and change of thermodynamic function of strontium-alloyed AKIM2 alloy]. *Izvestiia vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki*, 2018, vol. 21, no. 1, pp. 35–42.

16. Ganiev I.N., Iakubov U.Sh., Sangov M.M., Safarov A.G. Vliianie kal'tsiia na temperaturnuiu zavisimost' udel'noi teploemkosti i izmenenie termodinamicheskikh funktsii aluminievogo splava AZh5K10 [Calcium influence on temperature dependence of specific heat capacity and change of thermodynamic functions of aluminum alloy AZh5K10]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2018, vol. 21, no. 8, pp. 11–15.

17. Ganiev I.N., Niezov Kh.Kh., Gulov B.N., Nizomov Z., Berdiev A.E. Temperaturnaia zavisimost' teploemkosti i termodinamicheskikh funktsii splava AKIM2, legirovanogo praezodimom i neodimom [Temperature dependence of heat capacity and thermodynamic functions of AKIM2 alloy alloyed with praseodymium and neodymium]. *Vestnik SibGIU*, 2017, no. 3, pp. 32–39.

18. Ibrokhimov N.F., Ganiev I.N., Ganieva N.I. Vliianie itriia na teplofizicheskie svoistva splava AMg2 [Effect of Yttrium on Thermophysical Properties of AMg2 Alloy]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2017, № 2 (67), pp. 177–187.

19. Ibrokhimov N.F., Ganieva N.I., Ibrokhimov S.Z., Ganiev I.N., Nizomov Z. Effect of cerium on the thermophysical properties of AMg2 alloy. *Physics of Metals and Metallography*, 2016, vol. 117, no. 1, pp. 49–53.

20. Mulloeva N.M., Ganiev I.N., Eshov B.B., Makhmadulloev Kh.A., Nizomov Z. Teplofizicheskie svoistva i termodinamicheskie funktsii splavov sistema Pb–Sr [Thermophysical properties and thermodynamic functions of Pb–Sr system alloys]. *Izvestiia Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2014, vol. 6, no. 6, pp. 38–42.

21. Ibrokhimov S.Zh., Eshov B.B., Ganiev I.N., Ibrokhimov N.F. Vliianie skandiia na fiziko-khimicheskie svoistva splava AMg4 [Influence of scandium on physical and chemical properties of AMg4 alloy]. *Izvestiia Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2014, vol. 16, no. 4, pp. 256–260.

Получено 20.10.2020

Опубликовано 10.12.2020

Сведения об авторах

Ганиев Изатулло Наврузович (Душанбе, Таджикистан) – доктор химических наук, академик Национальной академии наук Таджикистана, профессор, завлабораторией «Коррозионностойкие материалы» Института химии им. В.И. Никитина Национальной академии наук Таджикистана, e-mail: ganiev48@mail.ru.

Алиев Джамшед Насридинович (Душанбе, Таджикистан) – кандидат технических наук, доцент кафедры материаловедения, металлургических машин и оборудования Таджикского технического университета им. М.С. Осими, e-mail: jamshed-7206@mail.ru.

Аминов Фируз Миррахимович (Душанбе, Таджикистан) – старший преподаватель кафедры деталей машин и строительного-дорожных машин Таджикского технического университета им. М.С. Осими, e-mail: navruz68@mail.ru.

About the authors

Izatullo N. Ganiev (Dushanbe, Tajikistan) – Doctor of Chemistry Science, Academician, National Academy of Sciences of Tajikistan, Professor, Head of the Laboratory "Corrosion-Resistant Materials", Institute of Chemistry named after V.I. Nikitin of the National Academy of Sciences of Tajikistan, e-mail: ganiev48@mail.ru.

Jamshed N. Aliev (Dushanbe, Tajikistan) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Materials Science, Metallurgical Machines and Equipment, Tajik Technical University named after M.S. Osim, e-mail: jamshed-7206@mail.ru.

Firuz M. Aminov (Dushanbe, Tajikistan) – Senior Lecturer, Department of Machine Parts and Road-Building Machines, Tajik Technical University named after M.S. Osim, e-mail: navruz68@mail.ru.