

Оригинальная статья

УДК 667.017: 533.9:536.71:546.36

DOI: 10.57070/2304-4497-2023-1(43)-50-58

ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК ЦИНКА НА ТЕМПЕРАТУРНУЮ ЗАВИСИМОСТЬ ТЕПЛОЕМОСТИ И ИЗМЕНЕНИЯ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ СВИНЦОВО-СУРЬМЯНОГО СПЛАВА ССуЗ

© 2023 г. И. Н. Ганиев¹, М. С. Аминбекова¹, Х. П. Наврузов¹, Б. Б. Эшов², М. М. Муллоева²

¹Институт химии им. В.И. Никитина НАН Таджикистана (734063, Республика Таджикистан, Душанбе, ул. Айни, 299/2)

²Центр по исследованию инновационных технологий НАН Таджикистана (734063, Республика Таджикистан, Душанбе, ул. Айни, 299/3)

Аннотация. Сплавы на основе свинца обладают высокой теплопроводностью и соответствуют предъявляемым потребителями требованиям по ударным нагрузкам. Некоторые изделия из сплавов на основе свинца имеют однородную зернистую структуру, поэтому их можно использовать при больших нагрузках и низких постоянных скоростях. Важнейшими физическими характеристиками свинцовых сплавов являются теплоемкость и термодинамические функции. Термодинамические и теплофизические свойства свинца и его сплавов – предмет многочисленных экспериментальных и теоретических исследований. Имеющиеся экспериментальные данные включают измерения теплоемкости, энтальпии, энтропии и энергии Гиббса при нормальном давлении в диапазоне температур 298,15 – 550 К. В настоящей работе удельная теплоемкость и термодинамические функции свинцово-сурьмяного сплава ССуЗ, легированного цинком, определялись в режиме «охлаждения» по известной теплоемкости эталонного образца из свинца марки С00. Путем обработки кривых скоростей охлаждения образцов из сплава ССуЗ с цинком и эталона получены полиномы, описывающие их скорости охлаждения. С использованием скорости охлаждения исследуемых образцов и эталона и их массы рассчитана удельная теплоемкость свинцово-сурьмяного сплава ССуЗ с цинком в зависимости от температуры. Показано, что с ростом температуры и содержания цинка теплоемкость, энтальпия и энтропия сплавов растут, а значение энергии Гиббса уменьшается. При увеличении содержания цинка теплоемкость и энергия Гиббса сплавов увеличиваются. Добавки цинка незначительно влияют на изменения энтальпии и энтропии сплава ССуЗ.

Ключевые слова: свинцово-сурьмяный сплав, цинк, теплоемкость, коэффициент теплоотдачи, энтальпия, энтропия, энергия Гиббса, температурная зависимость

Для цитирования: Ганиев И.Н., Аминбекова М.С., Наврузов Х.П., Эшов Б.Б., Муллоева М.М. Влияние добавок цинка на температурную зависимость теплоемкости и изменения термодинамических функций свинцово-сурьмяного сплава ССуЗ // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2023. № 1 (43). С. 50–58. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-1\(43\)-50-58](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-1(43)-50-58)

Original article

INFLUENCE OF ZINC ADDITIVES ON THE TEMPERATURE DEPENDENCE OF HEAT CAPACITY AND CHANGES IN THERMODYNAMIC FUNCTIONS OF LEAD-ANTIMONY ALLOY CCU3

© 2023 I. N. Ganiev¹, M. S. Aminbekova¹, H. P. Navruzov¹, B. B. Eshov², N. M. Mulloeva²

¹V.I. Nikitin Institute of Chemistry of the National Academy of Sciences of Tajikistan (299/2, Aini str., Dushanbe, 734063, Republic of Tajikistan)

²State Scientific Institution “Center for Innovation Development of Science and New Technologies” of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan (299/3, Aini str., Dushanbe, 734063, Republic of Tajikistan)

Abstract. The lead-based alloy has a high thermal conductivity and meets the requirements for shock loads imposed by consumers. Some lead-based alloy products have a uniform granular structure, so they can be used at high loads at low constant speeds. The most important physical characteristics of a lead alloy are the heat capacity and thermodynamic functions. The thermodynamic and thermophysical properties of lead and its alloys are the subject of numerous experimental and theoretical studies. Available experimental data include measurements of heat capacity, enthalpy, entropy and Gibbs energy at normal pressure in the temperature range of 298.15 – 550 K. In the present work, the specific heat capacity and thermodynamic functions of the lead-antimony alloy CCu3 doped with zinc were determined in the "cooling" mode by the known heat capacity of the reference sample made of lead grade C00. By working out the curves of the cooling rates of samples from the alloy SSu3 with zinc and the reference, polynomials describing their cooling rates were obtained. Using the cooling rate of the studied samples and the standard and their mass, the specific heat capacity of the lead-antimony alloy CCu3 with zinc was calculated depending on the temperature. It is shown that with increasing temperature and zinc content, the heat capacity, enthalpy and entropy of alloys increase, and the Gibbs energy value decreases. With an increase in the zinc content, the heat capacity and Gibbs energy of the alloys increase. Zinc additives have a negligible effect on changes in the enthalpy and entropy of the CCu3 alloy.

Keywords: lead-antimony alloy, zinc, heat capacity, heat transfer coefficient, enthalpy, entropy, Gibbs energy, temperature dependence

For citation: Ganiev I.N., Aminbekova M.S., Navruzov H.P., Eshov B.B. Mulloeva M.M. The effect of zinc additives on the temperature dependence of the heat capacity and changes in the thermodynamic functions of the lead-antimony alloy CCu3. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2023, no. 1 (43), pp. 50–58. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-1\(43\)-50-58](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-1(43)-50-58)

Введение

Свинец в сравнении с другими металлами обладает малой химической активностью и высокой коррозионной стойкостью. К недостаткам свинцовых оболочек, выполняемых из свинца при общем количестве примесей до 0,1 %, в первую очередь следует отнести низкие механическую прочность, вибростойкость и сопротивление ползучести [1 – 3]. Для повышения вибростойкости оболочек наиболее эффективным является применение не технического чистого свинца, а его сплавов. Введение легирующих элементов (сурьмы, олова, кадмия, теллура, мышьяка и др.), образующих различные химические соединения и твердые растворы, существенно улучшает механические и антикоррозионные свойства свинцовых сплавов [4 – 8].

Сплавы свинца с сурьмой обычно применяют для оболочек кабелей и пластин электрических аккумуляторов, используют при производстве пуль и типографского шрифта, а сплавы свинца с сурьмой и оловом – для фигурного литья и изготовления подшипников. Основным материалом для оболочек кабелей из свинцовых сплавов является технически чистый свинец [9]. Металлическая оболочка кабелей, выполняемая из свинцового сплава, должна обеспечивать герметичность и должна быть вибростойкой (то есть не разрушаться под воздействием вибрации в процессе эксплуатации в скважине); сохранять стабильную структуру и механические свойства при нагревании; иметь достаточно высокое сопротив-

ление ползучести (то есть не деформироваться под действием хоть и небольших, но длительных нагрузок); обеспечивать срок службы (то есть срок сохранения всех ее основных свойств) не менее срока службы кабеля в целом [10].

Теория метода и схема установки для определения теплоемкости сплавов

Существует много методов измерения теплоемкости твердого тела. В настоящей работе используется метод сравнения кривых охлаждения эталонного и исследуемого образцов. Исследуемый образец нагревают до температуры, превышающей температуру окружающей среды, после чего охлаждают. 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 [11 – 16].

Физические основы предлагаемого метода измерения состоят в следующем. Охлаждение образцов обусловлено тремя механизмами теплопередачи: теплопроводностью окружающей среды, конвекцией и излучением. Для первых двух процессов с хорошей точностью можно считать, что тепловой поток 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 теплоотдачи α зависит от большого количества параметров и для него невозможно дать общую формулу, поэтому 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 $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{К}^{-4}$ – постоянная Стефана–Больцмана; ε – коэффициент поглощения; S – площадь поверхности тела.

Лишь при небольшой разности температур $(T - T_0)$ приближенная зависимость определения теплового потока за счет излучения сводится к виду

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

Если не учитывать излучение и считать, что теплоемкость и коэффициент теплоотдачи постоянны, а окружающая среда бесконечна и однородна, то при охлаждении температура тела будет спадать по экспоненте. Действительно, уравнение теплового баланса

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

в данном случае имеет вид

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

где C_p^0 – удельная теплоемкость тела; m – масса тела.

Решением этого уравнения 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.

Таким образом, если выполняются все указанные выше условия, то теплоемкость материала образца можно определить по термограмме по параметру релаксации τ . Однако, поскольку величина α не известна, измерения нужно вести параллельно с эталонным образцом с известной

теплоемкостью и тех же размеров, чтобы условия охлаждения у образцов были идентичны. Если коэффициент α у образцов одинаков, то теплоемкость измеряемого материала C_x можно найти по формуле

$$C_x^0 = C_0^0 \frac{m_0 \tau_x}{m_x \tau_0}, \quad (7)$$

где C_x^0 – теплоемкость эталонного материала; m_x и m_0 – массы исследуемого и эталонного образцов;

$\tau_x = \left(\frac{dT}{dt}\right)_2$ и $\tau_0 = \left(\frac{dT}{dt}\right)_1$ – скорости охлаждения образцов из эталона и исследуемых сплавов.

Этот метод предполагает: постоянство значений C_x и C_0 , а также коэффициента α при изменении температуры; охлаждение в бесконечной среде; температуры образцов, при которых излучением можно пренебречь по сравнению с теплопроводностью и конвекцией. Несоблюдение любого из данных условий нарушает экспоненциальный ход кривой охлаждения.

Разумеется, учет зависимостей C_x и C_0 от температуры можно выполнить, разбив термограмму на узкие интервалы температур, в которых теплоемкости и коэффициент α можно считать постоянными, найдя для каждого интервала свои скорости охлаждения $\tau_x(T)$ и $\tau_0(T)$, которые и использовать для расчета значения $C_x(T)$. В настоящей работе определяются средние теплоемкости по всему измеряемому интервалу температур. Коэффициенты теплопередачи α для всех образцов предполагаются одинаковыми.

Для определения скорости охлаждения τ_0 и τ_x строят кривые охлаждения эталона и исследуемых образцов. Кривая охлаждения представляет собой зависимость температуры образца от времени при охлаждении его в неподвижном воздухе.

Измерение теплоемкости проводилось по методике, приведенной в работах [17 – 20]. Схема установки для измерения теплоемкости сплавов представлена на рис. 1 и включает следующие узлы: электропечь 3, смонтированную на стойке 6, по которой она может перемещаться вверх и вниз. Образец 4 и эталон 5 (также могут перемещаться) представляют собой цилиндры длиной 30 мм и диаметром 16 мм с высверленными каналами с одного конца, в которые вставлены термопары. Концы термопар 7 – 9 подведены к цифровому термометру «Digital Multimeter DI9208L».

Электропечь запускается через лабораторный автотрансформатор (ЛАТР) 1 при установке нужной температуры с помощью терморегуля-

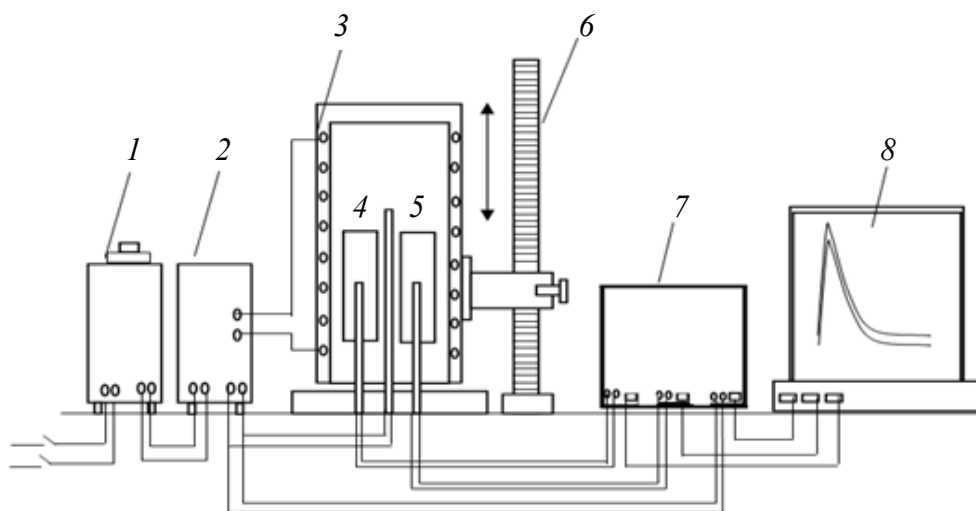


Рис. 1. Установка для определения теплоемкости твердых тел в режиме «охлаждения»:
 1 – автотрансформатор; 2 – терморегулятор; 3 – электропечь; 4 – образец; 5 – эталон; 6 – стойка электропечи;
 7 – многоканальный цифровой термометр; 8 – регистрирующий прибор (компьютер)

Fig. 1. Installation for determining the heat capacity of solids in the "cooling" mode:
 1 – autotransformer; 2 – thermostat; 3 – electric furnace; 4 – sample; 5 – standard; 6 – electric furnace rack;
 7 – multichannel digital thermometer; 8 – recording device (computer)

тора 2. По показаниям цифровых термометров фиксируется значение начальной температуры. При помещении образца и эталона в электропечь осуществляется их нагрев до нужной температуры, при этом температура контролируется по показаниям цифровых термометров на компьютере 10. Образец и эталон одновременно вынимаются из электропечи и с этого момента фиксируется температура. Показания цифрового термометра фиксируются на компьютер через каждые 10 с до охлаждения образца и эталона до температуры ниже 35 °С.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Теплоемкость свинцово-сурьмяного сплава $ССу_3$ с цинком измеряли в режиме «охлаждения». Обработку результатов измерений и построение графиков проводили с помощью программ MS Excel и Sigma Plot. Значение коэффициента корреляции ($R_{\text{корр}} \geq 0,9984$) подтверждает правильность выбора аппроксимирующей функции. Экспериментально полученные кривые охлаждения образцов из свинцово-сурьмяного сплава $ССу_3$ с цинком представлены на рис. 2, а. Полученные зависимости темпера-

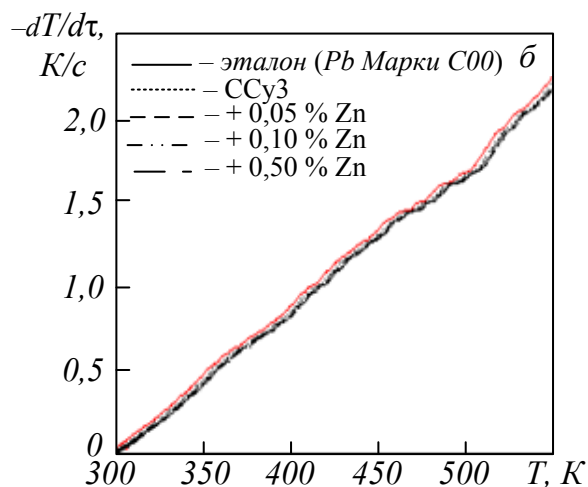
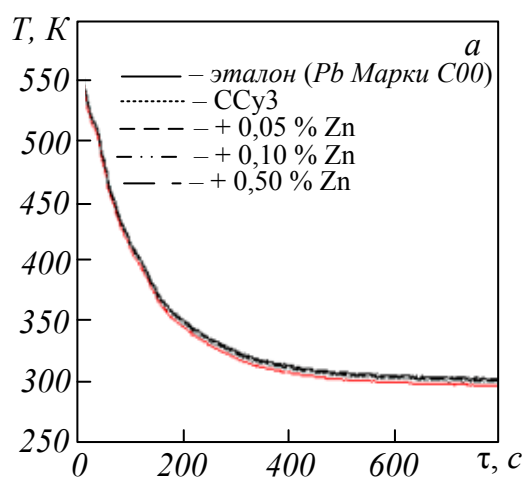


Рис. 2. Зависимости температуры от времени охлаждения (а) и скорости охлаждения от температуры (б) для образцов из свинцово-сурьмяного сплава $ССу_3$ с разным количеством цинка и эталона (Pb марки C00):

1 – эталон; 2 – сплав $ССу_3$; 3 – 5 – свинцово-сурьмяный сплав с содержанием 0,05, 0,10 и 0,50 % Zn

Fig. 2. Temperature dependences on cooling time (a) and cooling rate on temperature (b) for samples of lead-antimony alloy $ССу_3$ with different amounts of zinc and standard (Pb grade C00):

1 – standard; 2 – alloy $ССу_3$; 3 – 5 – lead-antimony alloy with a content of 0.05, 0.10 and 0.50 % Zn

Значения коэффициентов a, b, p, k, ab, pk в уравнении (9) для свинцово-сурьмяного сплава ССу3, легированного цинком, и эталона (Pb марки С00)
The values of the coefficients a, b, p, k, ab, pk in equation (9) for lead-antimony ССу3 alloy alloyed with zinc and the reference (Pb grade С00)

Содержание цинка в сплаве, %	a, K	$b \cdot 10^{-3}, c^{-1}$	p, K	$k \cdot 10^{-5}, c^{-1}$	$ab \cdot 10^{-2}, K \cdot c^{-1}$	$pk \cdot 10^{-3}, K \cdot c^{-1}$
ССу3	264,43	8,87	305,18	0,280	0,23	8,59
0,0 5	264,44	8,87	307,68	0,280	0,23	8,59
0,10	264,44	8,87	309,18	0,270	0,23	8,60
0,50	264,44	8,87	306,48	0,028	0,23	8,59
Эталон	264,43	8,86	302,18	0,028	0,23	8,59

туры от времени охлаждения для образцов из сплавов описываются уравнением вида

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

Кривые зависимости скорости охлаждения от температуры для образцов из свинцово-сурьмяного сплава ССу3, легированного цинком, представлены на рис. 2, б.

Дифференцируя зависимость (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 табл. 1.

По рассчитанным значениям скорости охлаждения образцов из сплавов и эталона по уравнению (7) была вычислена удельная теплоемкость сплава ССу3 с цинком, которая представлена в табл. 2 и на рис. 3, а. С ростом содержания цинка в сплаве ССу3 и температуры теплоемкость сплавов увеличивается. Для свинцово-

сурьмяного сплава ССу3, легированного цинком, температурная зависимость коэффициента теплоотдачи показана на рис. 3, б. Добавки цинка незначительно влияют на коэффициент теплоотдачи исходного сплава.

Результаты расчета показывают, что температурная зависимость удельной теплоемкости свинцово-сурьмяного сплава ССу3, легированного цинком, и эталона (Pb марки С00) описываются уравнением вида

$$C_{p_0}^0 = a + bT + cT^2 + dT^3 \quad (10)$$

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

Используя вычисленные данные по теплоемкости свинцово-сурьмяного сплава ССу3, легированного цинком, и экспериментально полученные скорости охлаждения образцов, был рассчитан коэффициент теплоотдачи (рис. 3, б) для сплавов и эталона (Pb марки С00) по следующей формуле:

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

Температурная зависимость удельной теплоемкости свинцово-сурьмяного сплава ССу3, легированного цинком, и эталона (Pb марки С00)
Temperature dependence of the specific heat capacity of lead-antimony ССу3 alloy alloyed with zinc and the standard (Pb grade С00)

Содержание цинка в сплаве, %	Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К), при T, K					
	300	350	400	450	500	550
ССу3	131,57	141,38	146,19	148,29	149,93	153,41
0,05	131,65	142,44	148,07	150,91	153,33	157,69
0,10	132,02	142,79	148,48	151,40	153,86	158,17
0,50	132,12	142,90	148,58	151,54	154,16	158,83
Эталон	127,50	130,23	132,80	135,24	137,60	139,91

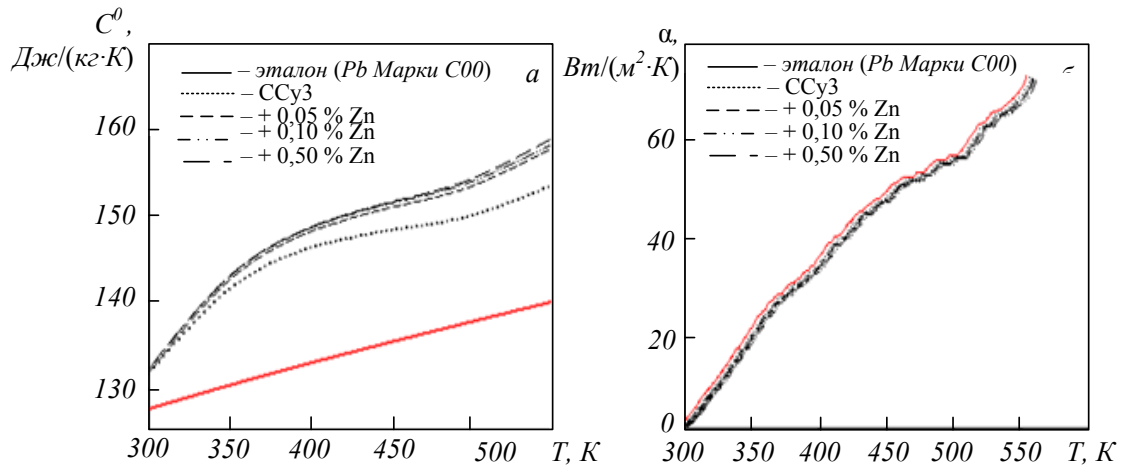


Рис. 3. Температурная зависимость удельной теплоемкости (а) и коэффициента теплоотдачи (б) свинцово-сурьмяного сплава ССуЗ, легированного цинком, и эталона (Pb марки С00):

1 – эталон; 2 – сплав ССуЗ; 3 – 5 – свинцово-сурьмяный сплав с содержанием 0,05, 0,10 и 0,50 % Zn

Fig. 3. Temperature dependence of specific heat capacity (a) and heat transfer coefficient (b) of lead-antimony alloy CCu3, alloyed with zinc, and standard (Pb grade C00):

1 – standard; 2 – alloy Ccu3; 3 – 5 – lead-antimony alloy with a content of 0.05, 0.10 and 0.50 % Zn

Для расчета температурной зависимости изменений энтальпии, энтропии и энергии Гиббса сплава ССуЗ

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

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

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

были использованы интегралы от удельной теплоемкости (уравнение (10)); $T_0 = 298,15$ К.

Результаты расчета температурных зависимостей изменений энтальпии, энтропии и энергии Гиббса для свинцово-сурьмяного сплава

ССуЗ с цинком и эталона через 50 К представлены в табл. 4.

Изменения теплоемкости и термодинамических функций сплава ССуЗ при легировании его цинком до 0,5 % объясняются происходящими структурными преобразованиями в результате такого процесса.

Выводы

В режиме «охлаждения» исследована температурная зависимость удельной теплоемкости свинцово-сурьмяного сплава ССуЗ, легированного цинком. В качестве эталона при исследованиях использован свинец марки С00 (99,99 % Pb).

Установлено, что с ростом температуры и содержания цинка теплоемкость сплава ССуЗ увеличивается. Математической обработкой результатов исследования получен полином температурной зависимости теплоемкости сплавов. Коэффициент теплоотдачи сплавов с увеличением температуры растет, а с ростом количества легирующего компонента незначительно уменьшается.

Т а б л и ц а 3

Значения коэффициентов a, b, c, d в уравнении (10) для свинцово-сурьмяного сплава ССуЗ, легированного цинком, и эталона (Pb марки С00)

The values of the coefficients a, b, c, d in equation (10) for lead-antimony CCu3 alloy alloyed with zinc and the reference (Pb grade C00)

Содержание цинка в сплаве, %	a, Дж/(кг·К)	b, Дж/(кг·К ²)	c·10 ⁻³ , Дж/(кг·К ³)	d·10 ⁻⁵ , Дж/(кг·К ⁴)	Коэффициент корреляции R
ССуЗ	-159,3	1,9	4,18	0,303	0,9985
0,05	-174,1	2,0	4,35	0,316	0,9987
0,10	-168,6	2,0	4,25	0,308	0,9986
0,50	-173,3	2,0	4,36	0,318	0,9984
Эталон	105,6	0,1	0,08	0,005	1

Температурная зависимость изменений термодинамических функций свинцово-сурьмяного сплава ССу_3 , легированного цинком, и эталона (Pb марки С00)
Temperature dependence of changes in thermodynamic functions of lead-antimony CCu_3 alloy alloyed with zinc and the standard (Pb grade С00)

Содержание цинка в сплаве, %	Значение функции при T , К					
	300	350	400	450	500	550
	$[H^0(T) - H^0(T_0^*)]$, кДж/кг					
Сплав ССу_3	0,2462	7,2016	14,5480	22,0976	29,7763	37,6234
0,05	0,2430	7,1216	14,4009	21,8820	29,4848	37,2475
0,10	0,2437	7,1403	14,4387	21,9427	29,5717	37,3602
0,50	0,2439	7,1460	14,4496	21,9591	29,5983	37,4098
Эталон	0,2357	6,6798	13,2562	19,9577	26,7791	33,7169
	$[S^0(T) - S^0(T_0^*)]$, кДж/кг·К					
Сплав ССу_3	0,00082	0,02224	0,04186	0,05964	0,07582	0,09077
0,05	0,00081	0,02202	0,04151	0,05923	0,07539	0,09035
0,10	0,00081	0,02205	0,04154	0,05921	0,07528	0,09013
0,50	0,00081	0,02207	0,04157	0,05925	0,07535	0,09024
Эталон	0,00078	0,02065	0,03821	0,05399	0,06836	0,08158
	$[G^0(T) - G^0(T_0^*)]$, кДж/кг					
Сплав ССу_3	-0,00076	-0,58455	-2,19497	-4,73967	-8,13204	-12,3009
0,05	-0,00069	-0,58406	-2,20389	-4,77462	-8,21214	-12,4442
0,10	-0,00075	-0,57925	-2,17681	-4,70284	-8,0713	-12,2109
0,50	-0,00075	-0,57971	-2,17851	-4,70643	-8,07759	-12,2214
Эталон	-0,00073	-0,54769	-2,02751	-4,33911	-7,40333	-11,1565

Рассчитаны величины изменений энтальпии, энтропии и энергии Гиббса сплавов в зависимости от температуры и содержания в сплавах цинка. Показано, что с ростом температуры энтальпия и энтропия сплавов растут, а энергия Гиббса уменьшается. Добавки цинка до 0,5 % незначительно влияют на изменения термодинамических функций сплавов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Vasilevskii P.A., Moskalev S.A., Zheleznyak L.M., Golovanov S.A. Organization of high quality lead-antimony shot production // *Metallurgist*. 2015. Vol. 58. No. 9-10. P. 831–834.
- Garkushin G.V., Savinykh A.S., Razorenov S.V., Kanel' G.I., Ignatova O.N., Podurets A.M., Tkachenko M.I. Effect of thermal treatment on the Hugoniot elastic limit and spall strength of the preeutectic Pb–2.77 % Sb alloy // *The Physics of Metals and Metallography*. 2020. Vol. 121. No. 11. P. 1119–1125.
- Liu H.T., Yang C.X., Liang H.H., Yang J., Zhou W.F. The mechanisms for the growth of the anodic Pb(II) oxides films formed on Pb-Sb and Pb-Sn alloys in sulfuric acid solution // *Journal of Power Sources*. 2002. Vol. 103. No. 2. P. 173–179. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(01\)00839-4](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(01)00839-4)
- Mansimova Sh.H., Mirzoeva R.J., Mashadiyeva L.F., Babanly M.B. Thermodynamic properties of lead-antimony selenides // *Applied Solid State Chemistry*. 2018. No. 4. P. 104–111. <https://doi.org/10.18572/2619-0141-2018-4-5-104-111>
- Rosalbino F., Scavino G., Carlini R., Zanicchi G. Microstructural characterization and corrosion behavior of lead, bismuth and antimony tellurides prepared by melting // *Journal of Alloys and Compounds*. 2013. Vol. 567. P. 26–32. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.03.071>
- Arkhipov P.A., Grishenkova O.V., Kholkina A.S. Thermodynamic characteristics of liquid metallic alloys containing lead, antimony and bismuth // *Journal of Molecular Liquids*. 2021. Vol. 335. P. 116–171. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.116071>
- Buongiorno J., Loewen E.P., Czerwinski K., Larson C. Studies of polonium removal from molten lead-bismuth for lead-alloy – cooled reactor applications // *Nuclear Technology*. 2004. Vol. 147. No. 3. P. 406–417. <https://doi.org/10.13182/NT04-A3539>
- Zhang S.T., Kong F.P., Muller R.H. Effect of ion implantation on the corrosion behavior of lead and a lead-antimony alloy // *Journal of the Electrochemical Society*. 1994. Vol. 141. No. 10. P. 2677–2681. <https://doi.org/10.3390/coatings10040313>
- Shiota M., Kameda T., Matsui K., Hirai N., Tanaka T. Electrochemical properties of lead dioxides formed on various lead alloy substrates // *Journal of Power Sources*. 2005. Vol. 144. No. 2. P. 358–364.

10. Li N. Lead-alloy coolant technology and materials – technology readiness level evaluation // *Progress in Nuclear Energy*. 2008. Vol. 50. No. 2-6. P. 140–151. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2007.10.016>
 11. Антонов Е.А., Соболев В.В. Определение удельной теплоемкости металлов методом охлаждения. Учебно-методическое пособие. Ижевск: ИЖТГУ, 2015. 24 с.
 12. Менлиев Ш., Гуллыева А., Спиридонов А. Определение теплоемкости металлов методами нагрева и охлаждения. В кн: Сборник научных трудов студентов. Элиста: КалмГУ, 2020. 119 – 121 с.
 13. Ростокин В.И. Исследование зависимости теплоемкости металлов от температуры // *Физическое образование в ВУЗах*. 2011. Т. 17. № 3. С. 54–65.
 14. Киров С.А., Козлов А.В., Салецкий А.М., Харабадзе Д.Э. Измерение теплоемкости и теплоты плавления методом охлаждения. Учебное пособие. Москва: ООП Физический факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, 2022. 26 с.
 15. Тарсин А.В., Костерин К.С. Определение теплоемкости металлов методом охлаждения. Лабораторные занятия. Ухта: УГТУ, 2014. 98 с.
 16. Рогачев Н.М., Гусева С.И. Определение удельной теплоемкости твердых тел. Метод. указания к лабор. работе № 1-23. Самара: СГАУ им. С.П. Королёва, 2012. 115 с.
 17. Худойбердизода С.У., Ганиев И.Н., Отаджонов С.Э., Эшов Б.Б., Якубов У.Ш. Влияние меди на теплоемкость и изменения термодинамических функций свинца // *Теплофизика высоких температур*. 2021. Т. 59. № 1. С. 55–61. <https://doi.org/10.31857/S0040364421010099>
 18. Ганиев И.Н., Муллоева Н.М., Обидов Ф.У., Иброхимов Н.Ф. Температурная зависимость теплоемкости и термодинамических функций сплавов системы Pb-Ca // *Теплофизика высоких температур*. 2014. Т. 52. № 1. С. 147–150. <https://doi.org/10.7868/S0040364414010098>
 19. Наврузов Х.П., Ганиев И.Н., Амонулло Х., Эшов Б.Б., Муллоева Н.М. Влияние добавок кадмия на теплофизические свойства и термодинамические функции свинца // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2020. Т. 18. № 3. С. 42–49. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-3-42-49>
 20. Ганиев И.Н., Ниёзов О.Х., Сафаров А.Г., Муллоева Н.М. Влияние стронция на теплоёмкость и изменение термодинамических функций свинцового сплава SSu3 // *Известия Санкт-Петербургский государственной технической институт (технологический университет)*. 2018. № 47. С. 36–42.
- REFERENCES**
1. Vasilevskii P.A., Moskalev S.A., Zheleznyak L.M., Golovanov S.A. Organization of high quality lead-antimony shot production. *Metallurgist*. 2015, vol. 58, no. 9-10, pp. 831–834.
 2. Garkushin G.V., Savinykh A.S., Razorenov S.V., Kanel' G.I., Ignatova O.N., Podurets A.M., Tkachenko M.I. Effect of thermal treatment on the hughoniot elastic limit and spall strength of the preeutectic Pb–2.77 % Sb alloy. *The Physics of Metals and Metallography*. 2020, vol. 121, no. 11, pp. 1119–1125
 3. Liu H.T., Yang C.X., Liang H.H., Yang J., Zhou W.F. The mechanisms for the growth of the anodic Pb(II) oxides films formed on Pb-Sb and Pb-Sn alloys in sulfuric acid solution. *Journal of Power Sources*. 2002, vol. 103, no. 2, pp. 173–179. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(01\)00839-4](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(01)00839-4)
 4. Mansimova Sh.H., Mirzoeva R.J., Mashadiyeva L.F., Babanly M.B. Thermodynamic properties of lead-antimony selenides. *Applied Solid State Chemistry*. 2018, no. 4, pp. 104–111. <https://doi.org/10.18572/2619-0141-2018-4-5-104-111>
 5. Rosalbino F., Scavino G., Carlini R., Zanicchi G. Microstructural characterization and corrosion behavior of lead, bismuth and antimony tellurides prepared by melting. *Journal of Alloys and Compounds*. 2013, vol. 567, pp. 26–32. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.03.071>
 6. Arkhipov P.A., Grishenkova O.V., Kholkina A.S. Thermodynamic characteristics of liquid metallic alloys containing lead, antimony and bismuth. *Journal of Molecular Liquids*. 2021, vol. 335, pp. 116–171. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.116071>
 7. Buongiorno J., Loewen E.P., Czerwinski K., Larson C. Studies of polonium removal from molten lead-bismuth for lead-alloy – cooled reactor applications. *Nuclear Technology*. 2004, vol. 147, no. 3, pp. 406–417. <https://doi.org/10.13182/NT04-A3539>
 8. Zhang S.T., Kong F.P., Muller R.H. Effect of ion implantation on the corrosion behavior of lead and a lead-antimony alloy. *Journal of the Electrochemical Society*. 1994, vol. 141, no. 10, pp. 2677–2681. <https://doi.org/10.3390/coatings10040313>
 9. Shiota M., Kameda T., Matsui K., Hirai N., Tanaka T. Electrochemical properties of lead dioxides formed on various lead alloy substrates. *Journal of Power Sources*. 2005, vol. 144, no. 2, pp. 358–364.
 10. Li N. Lead-alloy coolant technology and materials – technology readiness level evaluation. *Progress in*

- Nuclear Energy*. 2008, vol. 50, no. 2-6, pp. 140–151. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2007.10.016>
11. Antonov E.A., Sobolev V.V. *Determination of specific heat capacity of metals by cooling. Educational and methodological manual*. Izhevsk: IzhGTU. 2015, 24 p. (In Russ).
 12. Menliev Sh., Gullyeva A., Spiridonov A. Determination of the heat capacity of metals by heating and cooling methods. In: *Collection of scientific works of students*. Elista: KalmSU. 2020, pp.119–121. (In Russ).
 13. Rostokin V.I. Study of the dependence of the heat capacity of metals on temperature. *Physical education in universities*. 2011, vol. 17, no. 3, pp. 54–65. (In Russ).
 14. Kirov S.A., Kozlov A.V., Saletsky A.M., Kharabadze D.E. *Measurement of heat capacity and heat of melting by cooling. Textbook*. Moscow: EPT Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, 2022. 26 p. (In Russ).
 15. Tarsin A.V., Kosterin K.S. *Determination of the heat capacity of metals by cooling. Laboratory classes*. Ukhta: USTU, 2014. 98 p. (In Russ).
 16. Rogachev N.M., Guseva S.I. *Determination of the specific heat capacity of solids: Method. instructions to the lab. work no. 1-23*. Samara: SNRU named after S.P. Korolev, 2012. 115 p. (In Russ).
 17. Khudoiberdizoda S.U., Ganiev I.N., Otadzhonov S.E., Eshov B.B., Yakubov U.S. Influence of copper on heat capacity and changes in thermodynamic functions of lead. *Teplofizika vysokih temperatur*. 2021, vol. 59, no. 1, pp. 55–61. (In Russ). <https://doi.org/10.31857/S0040364421010099>
 18. Ganiev I.N., Mulloeva N.M., Obidov F.U., Ibrokhimov N.F. Temperature dependence of heat capacity and thermodynamic functions of alloys of the Pb–Ca system. *Teplofizika vysokih temperatur*. 2014, vol. 52, no. 1, pp. 147–150. (In Russ). <https://doi.org/10.7868/S0040364414010098>
 19. Navruzov H.P., Ganiev I.N., Amonullo Kh., Eshov B.B., Mulloeva N.M. Influence of cadmium additives on thermophysical properties and thermodynamic functions of lead. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk Technical University*. 2020, vol. 18, no. 3, pp. 42–49. (In Russ). <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-3-42-49>
 20. Ganiev I.N., Niyozov O.Kh., Safarov A.G., Mulloeva N.M. Influence of strontium on heat capacity and change in thermodynamic functions of lead alloy SSu3. *Bulletin of the Saint Petersburg State Institute of Technology (Technical University)*. 2018, no. 47, pp. 36–42. (In Russ).

Сведения об авторах

Изатулло Наврузович Ганиев, д.х.н., профессор, академик Национальной академии наук Таджикистана, заве-

дующий лабораторией, Институт химии В.И. Никитина Национальной академии наук Таджикистана
E-mail: ganievizatullo48@gmail.com
ORCID: 0000-0002-2791-6508

Мукадас Сироджидиновна Аминбекова, докторант, Институт химии им. В.И. Никитина Национальной академии наук Таджикистана

Бахтиёр Бадалочик Эшов, д.т.н., доцент, директор, Центр исследования инновационных технологий при Национальной академии наук Таджикистана
E-mail: ishov1967@mail.ru
ORCID: 0000-0002-1145-1254

Нукра Мазабиевна Муллоева, к.х.н., заведующий лабораторией, Центр исследования инновационных технологий при Национальной академии наук Таджикистана
E-mail: mulloeva.1984@mail.ru
ORCID: 0000-0001-5201-5542

Хуршед Парвизович Наврузов, младший научный сотрудник, Институт химии им. В.И. Никитина Национальной академии наук Таджикистана

Information about authors

Izatullo N. Ganiev, Academician at NAST, Dr. Sci. (Chem.), professor, head of the laboratory, V.I. Nikitin Institute of Chemistry of the National Academy of Sciences of Tajikistan
E-mail: ganiev48@mail.ru
ORCID: 0000-0002-2791-6508

Mukadas Sirodzhidinovna Aminbekova, postdoctoral student, V.I. Nikitin Institute of Chemistry of the National Academy of Sciences of Tajikistan

Bakhtier B. Eshov, Dr. Sci. (Eng.), associate lecturer, director, State Scientific Institution “Center of Innovation Development of Science and New Technologies” of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan
E-mail: ishov1967@mail.ru
ORCID: 0000-0002-1145-1254

Nukra M. Mulloeva, Cand. Sci. (Chem.), head of the laboratory, State Scientific Institution “Center of Innovation Development of Science and New Technologies” of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan
E-mail: mulloeva.1984@mail.ru;
ORCID: 0000-0001-5201-5542

Khurshed Parvizovich Navruzov, junior researcher, V.I. Nikitin Institute of Chemistry of the National Academy of Sciences of Tajikistan

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

Поступила в редакцию 09.12.2021
 После доработки 27.02.2023
 Принята к публикации 06.03.2023

Received 09.12.2021
 Revised 27.02.2023
 Accepted 06.03.2023