

**МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА
МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ
METALLURGY AND HEAT TREATMENT OF METALS AND ALLOYS**

Научная статья

УДК 620.179.143.5

DOI: 10.26730/1999-4125-2026-2-36-44

**ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ
СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Zn-In**

Ганиев Изатулло Наврузович¹, Атоев Гулмурод Мирзоевич², Исмонов Рустам Довудович
(Исмонзода Рустам Довудович)¹, Абдухоликова Парвина Носировна³

¹Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими

²Дангаринский государственный Университет

³Институт химии имени В.И. Никитина НАН Таджикистана

* e-mail: ganievizatullo48@gmail.com

Аннотация.

Изделия из цинковых сплавов, полученные различными способами литья и деформации, широко применяются в судостроении, приборостроении, авиационной, автомобильной и других отраслях промышленности. Успешное использование цинковых сплавов для конструкционных и не конструкционных целей обусловлено их технологическими, физико-химическими и эксплуатационными свойствами. Так, низкая температура плавления и высокие литейные свойства цинковых сплавов позволяют при литье под давлением и в кокиль получать отливки высокой прочности с поверхностью хорошего качества, которые практически не требуют дополнительной обработки. Цинк занимает особенное положение в ряде металлов, которые в основном используются в промышленных целях. Простой не легированный цинк в промышленности практически не применяется, его механические, физические, технологические и другие характеристики являются недостаточно благоприятными для использования. Дополнительное легирование цинка различными содержаниями химических элементов положительно сказывается на свойствах цинковых сплавов, при этом указанные характеристики цинковых сплавов существенно усиливаются. Поэтому большая часть получаемого цинка направляется на получение сплавов на основе цинка и в качестве защитного покрытия стальных изделий. Известны также различные методы напыления цинковых покрытий – газотермические и др. Использование указанных методов существенно улучшает защитные характеристики цинковых покрытий, но, тем не менее, проблема упрощения нанесения таких покрытий полностью не решена при эксплуатации металлических изделий и конструкций. В работе представлены результаты исследования температурной зависимости теплоемкости, коэффициента теплоотдачи и термодинамических функций сплавов системы Zn-In. Исследования проведены в режиме «охлаждения». Показано, что с ростом температуры теплоемкость, коэффициент теплоотдачи, энтальпия и энтропия сплавов увеличиваются, а значение энергии Гиббса уменьшается. Добавка индия до 1% (мас.) уменьшает теплоемкость, коэффициент теплоотдачи, энтальпию и энтропию исходного сплава и увеличивает величину энергии Гиббса.



Информация о статье

Поступила:

28 октября 2025 г.

Одобрена после

рецензирования:

15 мая 2026 г.

Принята к публикации:

11 июня 2026 г.

Опубликована:

29 июня 2026 г.

Ключевые слова:

сплавы системы Zn-In, теплоемкость, коэффициент теплоотдачи, режим «охлаждения», энтальпия, энтропия, энергия Гиббса

Для цитирования: Ганиев И.Н., Атоев Г.М., Исмонов Р.Д., Абдухоликова П.Н. Теплофизические свойства и термодинамические функции сплавов системы Zn-In // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2026. № 2 (174). С. 36-44. DOI: 10.26730/1999-4125-2026-2-36-44, EDN: QDGLXD

Введение

Цинк и его соединения занимают особое место в ряду металлов, которые активно применяются в различных отраслях промышленности и производства. В начале XIX века цинк добывался в мировом масштабе не более 900 т в год, однако сейчас добыча цинка в мировых масштабах превышает показатель в 10 млн т ежегодно. Цинк нашел широкое применение в современных условиях в зависимости от его сортности, для получения цинковых соединений, цинковых полуфабрикатов, сплавов на основе цинка, а также для цинкования стальных изделий [1–3].

В промышленности практически не применяется нелегированный цинк, который по сравнению с легированным обладает более низкими механическими, технологическими и физическими свойствами. Поэтому для улучшения различных характеристик цинка принято легировать его различными добавками с целью улучшения определенных заданных свойств [4–6].

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 [7].

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

Цель работы – исследование влияния добавки индия на теплофизические свойства и термодинамические функции цинка.

Материалы и методы исследования

Синтез сплавов проводили в шахтной лабораторной печи сопротивления типа СШОЛ при температуре 450–550 °С. В качестве шихты при получении сплавов системы Zn-In использовали цинк марки ЦВ00 (ГОСТ 3640-94), который дополнительно легировали расчетным количеством индия. Состав сплавов контролировали взвешиванием шихты и полученных сплавов. При отклонении массы сплавов более чем на 1-2% (отн.) синтез сплавов

проводили заново. Далее из расплава удаляли шлак и проводили литье образцов в графитовую изложницу для исследования теплофизических свойств. Образцы цилиндрической формы имели диаметр 16 мм и длину 30 мм.

Существует много методов измерения теплоемкости твердых тел. В данной работе используется метод сравнения кривых охлаждения исследуемого образца с эталоном. 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.

Измерение теплоемкости проводили на установке, схема которой представлена на Рис. 1 [8–14]. Электропечь 3 смонтирована на стойке 6, по которой она может перемещаться вверх и вниз. Образец 4 и эталон 5, которые тоже могут перемещаться, представляют собой цилиндры длиной 30 мм и диаметром 16 мм с высверленными каналами с одного конца, в которые вставлены термодпары. Концы термодпар подведены к многоканальному цифровому термометру Digital Multimeter DI9208L 7, 8, 9. Электропечь 3 запускается через лабораторный автотрансформатор (ЛАТР) 1 после установки нужной температуры с помощью терморегулятора 2. По показаниям многоканальных цифровых термометров 7, 8, 9 фиксируется значение начальной температуры. Образец 4 и эталон 5 вдвигаются в электропечь 3 и нагреваются до нужной температуры; температуру контролируют по показаниям многоканальных цифровых термометров на компьютере 10. Образец 4 и эталон 5 одновременно выдвигаются из электропечи 3, и с этого момента фиксируется температура. Показания многоканального цифрового термометра Digital Multimeter DI9208L записываются на компьютер 10 через каждые 10 с, до охлаждения температуры образца и эталона ниже 30°С.

Для измерения температуры использовали многоканальный цифровой термометр, который позволял прямо фиксировать результаты измерений на компьютере в виде таблиц. Точность измерения температуры составляла

0,1°C. Временной интервал фиксации температуры – 10 с.

Относительная ошибка измерения температуры в интервале от 40 до 400°C – ±1 %. Погрешность измерения теплоемкости по предлагаемой методике не превышает 4% в зависимости от температуры. В нашем случае погрешность составила 1,5%.

Обработку результатов измерений проводили с помощью программы MS Excel. Графики строили в программе Sigma Plot. Значение коэффициента корреляции составляло $R_{кор} > 0,999$, что подтверждает правильность выбора аппроксимирующей функции.

Результаты и их обсуждение

Экспериментально полученные временные зависимости температуры образцов (Рис. 2) описываются уравнением вида

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

где a, b, p, k – константы; τ – время охлаждения.

Дифференцируя уравнение (1) по τ , получаем уравнение для определения скорости охлаждения образцов:

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

По уравнению (2) были вычислены скорости охлаждения образцов из сплавов системы Zn-In, которые представлены на Рис. 2 б. Значения коэффициентов a, b, p, k, ab, pk в уравнении (2) для исследованных сплавов приведены в Таблице 1.

Далее по рассчитанным значениям скоростей охлаждения образцов из сплавов по уравнению (3) была вычислена удельная теплоемкость сплавов:

$$C_{p2}^0 = C_{p1}^0 \cdot \frac{m_1}{m_2} \cdot \frac{\left(\frac{dT}{d\tau}\right)_1}{\left(\frac{dT}{d\tau}\right)_2}, \quad (3)$$

где $m_1 = \rho_1 V_1$ – масса эталона; $m_2 = \rho_2 V_2$ – масса исследуемого образца; $\left(\frac{dT}{d\tau}\right)_2, \left(\frac{dT}{d\tau}\right)_1$ – скорости охлаждения образцов из сплавов и эталона при данной температуре.

Правомочность использования уравнения (3) для расчета теплоемкости сплавов представлен в работах [15–20].

С проведением полиномиальной регрессии было

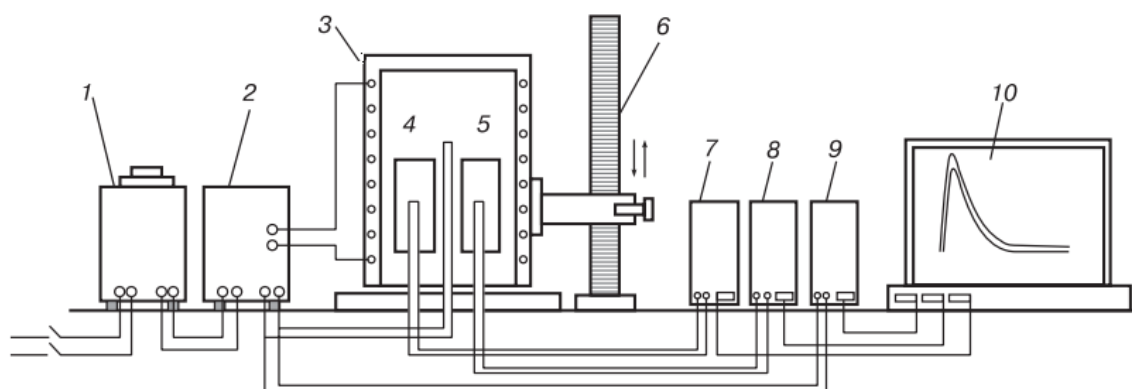


Рис. 1. Установка для определения теплоемкости твердых тел в режиме «охлаждения»
Fig. 1. Installation for determining the heat capacity of solids in the “cooling” mode

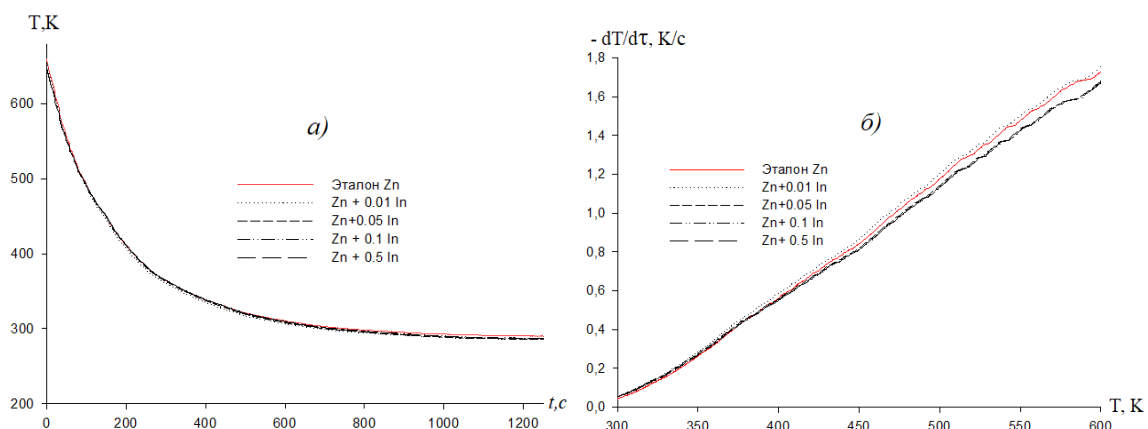


Рис. 2. График зависимости температуры от времени (а) и скорости охлаждения от температуры (б) образцов из сплавов системы Zn-In и для эталона (Zn марки ЦВ00 (ГОСТ 3640-94))
Fig. 2. Graph of the dependence of temperature on time (a) and cooling rate on temperature (b) for samples of Zn-In alloys and for the standard (Zn grade CV00 (GOST 3640-94))

получено уравнение для температурной зависимости удельной теплоемкости сплавов системы Zn-In:

$$C_{p0}^0 = a + bT + cT^2 + dT^3 \quad (4)$$

Значения коэффициентов в уравнении (4) приведены в Таблице 2.

Результаты расчета теплоемкости сплавов по формулам (3) и (4) при разных температурах

Таблица 1. Значения коэффициентов a, b, p, k, ab, pk в уравнение (2) для сплавов системы Zn-In и эталона (Zn)

Table 1. Values of the coefficients a, b, p, k, ab, pk in equation (2) for alloys of the Zn-In system and the standard (Zn)

Содержание индия в цинке, мас. %	a, К	b·10 ⁻³ , c ⁻¹	p, К	k·10 ⁻⁵ , c ⁻¹	ab, Кс ⁻¹	pk·10 ⁻² , Кс ⁻¹
0.0	333,91	6.08	316.86	7.90	2,03	2,50
0.01	333,90	6.08	313.07	8.00	2,03	2,50
0.05	325,91	5.79	313.34	8.20	1.89	2.57
0.1	325,92	5.79	314.83	8.16	1.89	2.57
0.5	325,92	5.79	314.43	8.17	1.89	2.57

Таблица 2. Значения коэффициентов a, b, c, d в уравнении (4) для образцов из сплавов системы Zn-In и эталона (Zn марки ЦВ00 (ГОСТ 3640-94))

Table 2. Values of the coefficients a, b, c, d in equation (4) for samples of Zn-In alloys and the standard (Zn grade CV00 (GOST 3640-94))

Содержание индия в цинке, мас. %	a, Дж/(кг·К)	b, Дж/(кг·К ²)	c·10 ⁻³ , Дж/(кг·К ³)	d·10 ⁻⁶ , Дж/(кг·К ⁴)	R ²
0.0	389,024	-0,1145	0.439	-0.192	1,00
0.01	389,1586	- 0.1150	0.439	- 0.192	0.998
0.05	389,1015	- 0.1150	0.439	- 0.192	0.998
0.1	389,4725	- 0.1160	0.437	- 0.191	0.998
0.5	389.2265	- 0.1170	0.435	- 0.187	0.988

Таблица 3. Температурная зависимость удельной теплоемкости (Дж/(кг·К)) сплавов системы Zn-In и эталона (Zn марки ЦВ00 (ГОСТ 3640-94))

Table 3. Temperature dependence of the specific heat capacity (J/(kg K)) of Zn-In alloys and the standard (Zn grade TsV00 (GOST 3640-94))

Содержание индия в цинке, мас. %	T, К						
	300	350	400	450	500	550	600
0.0	389.00	394,49	401,18	408,90	417,52	426,90	436,89
0.01	388,98	394,45	401,11	408,81	417,41	426,76	436,73
0.05	388,93	394,40	401,05	408,75	417,35	426,70	436,67
0.1	388,85	394,22	400,77	408,36	416,85	426,09	435,94
0.5	388,23	393,55	400,06	407,62	416,10	425,35	435,23

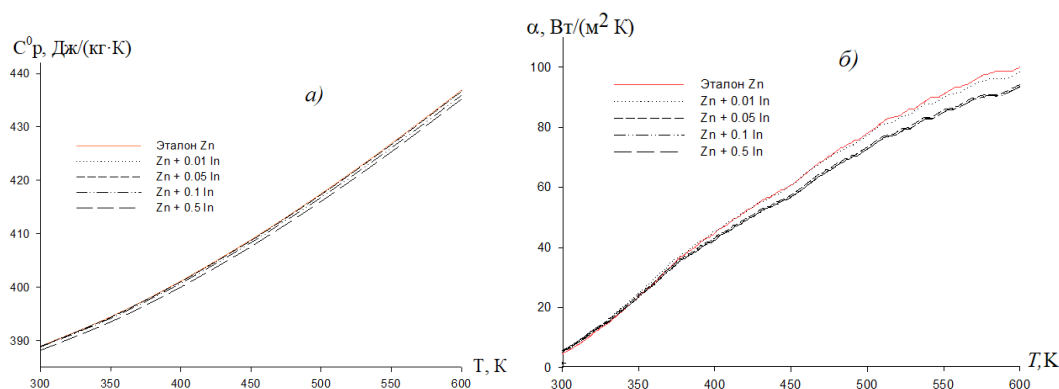


Рис. 3. Температурная зависимость теплоемкости (а) и коэффициента теплоотдачи (б) из сплавов системы Zn-In

Fig. 3. Temperature dependence of heat capacity (a) and heat transfer coefficient (b) of Zn-In alloys

представлены в Таблице 3 и на Рис. 3а. Теплоемкость сплавов с ростом концентрации индия в цинке уменьшается, а от температуры увеличивается.

Используя значения удельной теплоемкости сплавов цинка с индием и экспериментально полученные значения скоростей охладений образцов, вычислили температурную зависимость коэффициента теплоотдачи сплавов цинка с индием по уравнению:

$$\alpha = \frac{c_p m \frac{dT}{dT_0}}{(T-T_0) \cdot S}, \quad (5)$$

где T , T_0 – температура образца и окружающей среды соответственно; S , m – площадь поверхности и масса образца. Температурная зависимость коэффициента теплоотдачи сплавов системы Zn-In представлена на Рис. 3б. Добавка индия уменьшает коэффициент теплоотдачи цинка.

Для расчета температурной зависимости изменений энтальпии, энтропии и энергии Гиббса по (6) – (8) были использованы интегралы от удельной теплоемкости по уравнению (4):

$$H^0(T) - H^0(T_0) = a(T - T_0) + b(T^2 - T_0^2) + \frac{c}{3}(T^3 - T_0^3) + \frac{d}{4}(T^4 - T_0^4) \quad (6)$$

$$S^0(T) - S^0(T_0) = a \ln \frac{T}{T_0} + b(T - T_0) + \frac{c}{2}(T^2 - T_0^2) + \frac{d}{3}(T^3 - T_0^3), \quad (7)$$

$$[G^0(T) - G^0(T_0)] = [H^0(T) - H^0(T_0)] - T[S^0(T) - S^0(T_0)], \quad (8)$$

где $T_0 = 298,15\text{K}$.

Результаты расчета температурных

зависимостей изменений энтальпии, энтропии и энергии Гиббса по уравнениям (6) – (8) с шагом 50 К представлены в Таблице 4.

Выводы

В режиме «охлаждения» по известной теплоемкости эталонного образца из цинка марки ЦВ00 установлена теплоемкость сплавов системы Zn-In. С помощью полученных полиномиальных зависимостей показано, что с ростом температуры теплоемкость, энтальпия и энтропия сплавов увеличиваются, а значение энергии Гиббса уменьшается. Добавка индия в изученном концентрационном интервале (0,05–1,0% (мас.)) уменьшает теплоемкость, коэффициент энтальпии и энтропии исходного цинка, а энергия Гиббса при этом увеличивается. Уменьшение теплоемкости, коэффициента теплоотдачи, энтальпии и энтропии сплавов от концентрации индия в сплаве связано с его модифицирующим влиянием на структуру твердого раствора α -Zn и тем самым с увеличением степени гетерогенности структуры многокомпонентных сплавов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Виткин А. И., Тейндл И. И. Металлические покрытия листовой и полосовой стали. М. : Металлургия, 1971. 493 с.
2. Кечин В. А., Люблинский Е. Я. Цинковые сплавы. М. : Металлургия, 1986. 247 с.
3. Семенова И. В., Флорианович Г. М., Хорошилов А. В. Коррозия и защита от коррозии. М. : Физматлит, 2002. 336 с.

Таблица 4. Температурные зависимости изменений термодинамических функций сплавов системы Zn-In, легированных индием, и эталона (Zn марки ЦВ00 (ГОСТ 3640-94))

Table 4. Temperature dependences of changes in the thermodynamic functions of alloys of the Zn-In system, alloyed with indium and the standard (Zn grade CV00 (GOST 3640-94))

Содержание индия в цинке, мас. %	Т, К						
	300	350	400	450	500	550	600
[$H^0(T) - H^0(T_0^*)$], кДж/кг для сплавов							
Zn (эталон)	0,719484	20,3016	40,1887	60,43658	81,09375	102,2016	123,7942
0.01	0,719378	20,29796	40,1803	60,42213	81,07201	102,1713	123,7541
0.05	0,719351	20,29722	40,1788	60,41995	81,06912	102,1677	123,7498
0.1	0,719203	20,29051	40,1605	60,38468	81,01143	102,0820	123,6303
0.5	0,718061	20,25714	40,0926	60,28054	80,87016	101,9036	123,4159
[$S^0(T) - S^0(T_0^*)$], кДж/(кг·К) для сплавов							
Zn (эталон)	0,00240	0,06276	0,1159	0,16355	0,20707	0,24730	0,28487
0.01	0,00240	0,06276	0,1158	0,16354	0,20705	0,24726	0,28481
0.05	0,00240	0,06275	0,1158	0,16351	0,20702	0,24723	0,28478
0.1	0,00240	0,06273	0,1157	0,16342	0,20688	0,24704	0,28453
+0.5	0,00240	0,06263	0,1156	0,16314	0,20652	0,24661	0,28404
[$G^0(T) - G^0(T_0^*)$], кДж/кг для сплавов							
Zn (эталон)	-0,00222	-1,66677	-6,1584	-13,1637	-22,4448	-33,8166	-47,1312
0.01	-0,00222	-1,66889	-6,1623	-13,1689	-22,4509	-33,8230	-47,1371
0.05	-0,00222	-1,66643	-6,1571	-13,1605	-22,4390	-33,8074	-47,1175
0.1	-0,00222	-1,66595	-6,1548	-13,1547	-22,4275	-33,7877	-47,0868
0.5	-0,00222	-1,66325	-6,1447	-13,1326	-22,3894	-33,7298	-47,0058

4. Алихонова С. Д., Ганиев И. Н., Обидов З. Р. Цинк-алюминиевые сплавы Zn_{5Al} и Zn_{55Al} с церием, празеодимом и неодимом. Монография. Душанбе : РТСУ. 2022. 156 с.
5. Одиназода Х. О., Ганиев И. Н. Сплавы алюминия с бериллием, цинком и редкоземельными металлами. Монография. Душанбе : Промэкспо, 2021. 248 с.
6. Рахимов Ф. А., Ганиев И. Н., Обидов З. Р. Коррозия цинкового сплава $Zn_{0.5Al}$ с галлием, индием и таллием. Душанбе : Дониш, 2022. 116 с.
7. Ганиев И. Н., Содикова С. С., Якубов У.Ш., Алиханова С. Дж. Влияние алюминия на удельную теплоемкость и изменение термодинамических функций цинка // Ползуновский вестник. 2021. № 3. С. 208–216.
8. Исмонов Р. Д. Температурная зависимость теплоемкости и изменение термодинамических функций сплава АБ1 ($Al+1\%Be$), модифицированного галлием // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. 2021. № 3 (53). С. 31–34.
9. Ganiev I. N., Mulloeva N. M., Nizomov Z., Obidov F. U., Ibragimov N.F. Temperature dependence of the specific heat and thermodynamic functions of alloys of the Pb–Ca system // High Temperature. 2014. V. 52. Iss. 1. Pp. 138–140.
10. Ганиев И. Н., Ходжаназаров Х. М., Ходжаев Ф. К., Эшов Б. Б. Теплоемкость и термодинамические функции свинцового баббита БНа ($PbSb_{15}Sn_{10}Na$), легированного натрием // Журнал физической химии. 2023. № 4. С. 469–475.
11. Исмонов Р. Д., Ганиев И. Н., Одиназода Х. О., Сафаров А. М., Иброхимов Н. Ф. Удельная теплоемкость и изменение термодинамических функций алюминиевого сплава АБ1 ($Al+1\%Be$) // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. 2019. № 1 (45). С. 90–96.
12. Ганиев И. Н., Худойбердизода С. У., Савдуллоева С. С., Джайлоев Дж. Х., Ходжаназаров Х. М. Температурная зависимость теплоемкости и термодинамических функций алюминиевого сплава $AlMg_{5.5}Li_{2.1}Zr_{0.15}$ типа дюралюмин, легированного празеодимом // Инженерно-физический журнал. 2025. Т. 98. № 3. С. 749–756.
13. Ганиев И. Н., Джумъева М. Б., Ходжаназаров Х. М., Одиназода Х. О., Худойбердизода С. У. Влияние цинка на теплофизические свойства и термодинамические функции свинцового баббита $\delta(PbSb_{15}Sn_{10})$ // Инженерно-физический журнал. 2025. Т. 98. № 3. С. 742–748.
14. Исмонов Р. Д., Ганиев И. Н., Одиназода Х. О., Сафаров А. М., Алиев Ф. А. Влияние добавок индия на коррозионную устойчивость, теплоемкость и изменений термодинамических функций алюминиевого сплава АБ1 // Вестник Саратовского гос. тех. ун-та, 2022. № 3 (94). С. 81–91.
15. Киров С. А., Козлов А. В., Салецкий А. М., Харабазе Д. Э. Измерение теплоемкости и теплоты плавления методом охлаждения. Учебное пособие. М. : ООП Физический факультета МГУ им. М. В. Ломоносова, 2012. 23 с.
16. Рогачев Н. М., Гусева С. И. Определение удельной теплоемкости твердых тел: Метод. указания к лабор. работе №1–23. Самара : Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королева, 2012. 17 с.
17. Тарсин А. В., Костерин К. С. Определение теплоемкости металлов методом охлаждения. Лабораторные занятия. Ухта : Ухтинский государственный технический университет, 2014. 98 с.
18. Менлиев Ш., Гуллыева А., Спиридонов А. Определение теплоемкости металлов методами нагрева и охлаждения // Сборник научных трудов студентов. Элиста, 2020. С. 119–121.
19. Гусейнов Ф. Н., Сеидзаде А. Э., Юсубов Ю. А., Бабанлы М. Б. Термодинамические свойства соединения $SnSb_2Te_4$ // Неорганические материалы. 2017. Т. 53. № 4. С. 347–350.
20. Бодряков В. Ю. О корреляции температурных зависимостей теплового расширения и теплоемкости вплоть до точки плавления тугоплавкого металла: молибден // Теплофизика высоких температур. 2014. Т. 52. № 6. С. 863–868.

© 2026 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Ганиев Изатулло Наврузович – академик Национальной академии наук Таджикистана, д.х.н., профессор кафедры «Технология химических производств» Таджикского технического университета имени академика М. С. Осими, e-mail: ganievizatullo48@gmail.com;

Атоев Гулмурод Мирзоевич – зам. декана факультета естественно-математических и современных технологии Дангаринский государственный Университет, e-mail: atozoda91@bk.ru;

Исмонов Рустам Довудович (Исмонзода Р. Д.) – к.т.н., доцент кафедры «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты» Таджикского технического университета имени академика

М.С. Осими, e-mail: ird-78@mail.ru;

Абдухоликова Парвина Носировна – к.т.н., старший научный сотрудник Института химии имени В.И.Никитинг НАН Таджикистана, e-mail: abdukholiqovap95@mail.ru.

Заявленный вклад авторов:

Изатулло Наврузович Ганиев – постановка исследовательской задачи, концептуализация исследования, выводы, написание текста, научный менеджмент, сбор и теоретический анализ данных, обзор соответствующей литературы, экспериментальные исследования, обработка и анализ их результатов.

Гулмурод Мирзоевич Атоев – постановка исследовательской задачи, концептуализация исследования, выводы, написание текста, научный менеджмент, сбор и теоретический анализ данных, обзор соответствующей литературы, экспериментальные исследования, обработка и анализ их результатов.

Рустам Довудович Исмонов – постановка исследовательской задачи, концептуализация исследования, выводы, написание текста, научный менеджмент, сбор и теоретический анализ данных, обзор соответствующей литературы, экспериментальные исследования, обработка и анализ их результатов.

Парвина Носировна Абдухоликова – постановка исследовательской задачи, концептуализация исследования, выводы, написание текста, научный менеджмент, сбор и теоретический анализ данных, обзор соответствующей литературы, экспериментальные исследования, обработка и анализ их результатов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

THERMOPHYSICAL PROPERTIES AND THERMODYNAMIC FUNCTIONS OF Zn-In SYSTEM ALLOYS

Izatullo N. Ganiev¹, Gulmurod M. Atoev²,
Rustam D. Ismonov (Rustam D. Ismonzoda)¹, Parvina N. Abdukholikova³

¹ Tajik Technical University named after M.S. Osimi

² Dangara State University

³ Institute of Chemistry named after V.I. Nikitin NAS of Tajikistan

* for correspondence: ganievizatullo48@gmail.com



Article info

Received:

28 October 2025

Accepted for publication:

15 May 2026

Accepted:

11 June 2026

Published:

29 June 2026

Keywords: alloys of the Zn-In system, heat capacity, heat transfer coefficient, "cooling" mode, enthalpy, entropy, Gibbs energy

Abstract.

Products made from zinc alloys obtained by various casting and deformation methods are widely used in shipbuilding, instrument making, aviation, automotive and other industries. The successful use of zinc alloys for structural and non-structural purposes is due to their technological, physical, chemical and operational properties. Thus, the low melting point and high casting properties of zinc alloys make it possible to obtain high-strength castings with a good-quality surface using die casting and chill casting, which require virtually no additional processing. Zinc occupies a special position among metals that are mainly used for industrial purposes. Simple unalloyed zinc is practically not used in industry, its mechanical, physical, technological and other characteristics are not favorable enough for use. Additional alloying of zinc with various contents of chemical elements has a positive effect on the properties of zinc alloys, and the specified characteristics of zinc alloys are significantly enhanced. Therefore, most of the zinc obtained is used to obtain zinc-based alloys and as a protective coating for steel products. Various methods of spraying zinc coatings are also known – gas-thermal, etc. The use of these methods significantly improves the protective characteristics of zinc coatings, but, nevertheless, the problem of simplifying the application of such coatings has not been completely solved in the operation of metal products and structures. The paper presents the results of a study of the temperature dependence heat capacity, heat transfer coefficient and thermodynamic functions of alloys of the Zn-In system. The studies were conducted in the "cooling" mode. It was

shown that with increasing temperature, the heat capacity, heat transfer coefficient, enthalpy and entropy of the alloys increase, and the Gibbs energy value decreases. The addition of indium to 1% (mass.) reduces the heat capacity, heat transfer coefficient, enthalpy and entropy the original alloy and increases the Gibbs energy value.

For citation: Ganiev I.N., Atoev G.M., Ismonov R.D., Abdukholikova P.N. Thermophysical properties and thermodynamic functions of Zn-In system alloys. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2026; 2(174):36-44. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2026-2-36-44, EDN: QDGLXD

REFERENCES

1. Vitkin A.I., Tejndl I.I. *Metallicheskie pokrytiya listovoj i polosovoj stali*. M.: Metallurgiya; 1971. 493 s.
2. Kechin V.A., Lyublinskij E.YA. *Cinkovye splavy*. M.: Metallurgiya; 1986. 247 s.
3. Semenova I.V., Florianovich G.M., Horoshilov A.V. *Korroziya i zashchita ot korrozii*. M.: Fizmatlit; 2002. 336 s.
4. Alihonova S.D., Ganiev I.N., Obidov Z.R. *Cink-alyuminievye splavy Zn5Al i Zn55Al s ceriem, prazeodimom i neodimom*. Monografiya. Dushanbe: RTSU; 2022. 156 s.
5. Odinzoda H.O., Ganiev I.N. *Splavy alyuminiya s berillium, cinkom i redkozemel'nymi metallami*. Monografiya. Dushanbe: Promekspo; 2021. 248 s.
6. Rahimov F.A., Ganiev I.N., Obidov Z.R. *Korroziya cinkovogo splava Zn0.5Al s galliem, indiem i talliem*. Dushanbe: Donish; 2022. 116 s.
7. Ganiev I.N., Sodikova S.S., Yakubov U.Sh., Alihanova S.Dzh. *Vliyanie alyuminiya na udel'nuyu teploemkost' i izmenenie termodinamicheskikh funkcij cinka*. *Polzunovskij vestnik*. 2021; 3:208–216.
8. Ismonov R.D. *Temperaturnaya zavisimost' teploemkosti i izmenenie termodinamicheskikh funkcij splava AB1 (Al+1%Be), modifitsirovannogo gallium*. *Politekhnikeskij vestnik. Seriya: Inzhenernye issledovaniya*. 2021; 3(53):31–34.
9. Ganiev I.N., Mulloeva N.M., Nizomov Z., Obidov F.U., Ibragimov N.F. *Temperature dependence of the specific heat and thermodynamic functions of alloys of the Pb–Ca system*. *High Temperature*. 2014; 52(1):138–140.
10. Ganiev I.N., Hodzhanazarov H.M., Hodzhaev F.K., Eshov B.B. *Teploemkost' i termodinamicheskie funkcii svincovogo babbita BNa (PbSb15Sn10Na), legirovannogo natriem*. *Zhurnal fizicheskoy himii*. 2023; 4:469–475.
11. Ismonov R.D., Ganiev I. N., Odinzoda H.O., Safarov A.M., Ibrohimov N.F. *Udel'naya teploemkost' i izmenenie termodinamicheskikh funkcij alyuminievol'no splava AB1 (Al+1%Be)*. *Politekhnikeskij vestnik. Seriya: Inzhenernye issledovaniya*. 2019; 1(45):90–96.
12. Ganiev I.N., Hudojberdizoda S.U., Savdulloeva S.S., Dzhajloev Dzh.H., Hodzhanazarov H.M. *Temperaturnaya zavisimost' teploemkosti i termodinamicheskikh funkcij alyuminievol'no splava AlMg5.5Li2.1Zr0.15 tipa dyuralyumin, legirovannogo prazeodimom*. *Inzhenerno-fizicheskij zhurnal*. 2025; 98(3):749–756.
13. Ganiev I.N., Dzhum"aeva M.B., Hodzhanazarov H.M., Odinzoda H.O., Hudojberdizoda S.U. *Vliyanie cinka na teplofizicheskie svoystva i termodinamicheskie funkcii svincovogo babbita b(PbSb15Sn10)*. *Inzhenerno-fizicheskij zhurnal*. 2025; 98(3):742–748.
14. Ismonov R.D., Ganiev I.N., Odinzoda H.O., Safarov A.M., Aliev F.A. *Vliyanie dobavok indiya na korrozionnuyu ustojchivost', teploemkost' i izmenenij termodinamicheskikh funkcij alyuminievol'no splava AB1*. *Vestnik Saratovskogo gos. tekhn. un-ta*. 2022; 3(94):81–91.
15. Kirov S.A., Kozlov A.V., Saleckij A.M., Harabadze D.E. *Izmerenie teploemkosti i teploty plavlenniya metodom ohlazhdeniya*. Uchebnoe posobie. M.: OOP Fizicheskij fakul'teta MGU im. M.V. Lomonosova; 2012. 23 s.
16. Rogachev N.M., Guseva S.I. *Opreделение udel'noj teploemkosti tverdyh tel: Metod. ukazaniya k labor. rabote № 1–23*. Samara: Samarskij gosudarstvennyj aerokosmicheskij universitet imeni akademika S.P. Korolyova; 2012. 17 s.
17. Tarsin A.V., Kosterin K.S. *Opreделение teployomkosti metallov metodom ohlazhdeniya*. *Laboratornye zanyatiya*. Uhta: Uhtinskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet; 2014. 98 s.
18. Menliev Sh., Gullyeva A., Spiridonov A. *Opreделение teploemkosti metallov metodami nagreva i ohlazhdeniya*. *Sbornik nauchnykh trudov studentov*. Elista, 2020. S. 119–121.
19. Gusejnov F.N., Seidzade A.E., Yusibov Yu.A., Babanly M.B. *Termodinamicheskie svoystva soedineniya SnSb2Te4*. *Neorganicheskie materialy*. 2017; 53:4:347–350.
20. Bodryakov V.Yu. *O korrelyacii temperaturnykh zavisimostej teplovogo rasshireniya i teploemkosti vplot' do tochki plavlenniya tugoplavkogo metalla: molibden*. *Teplofizika vysokih temperatur*. 2014; 52(6):863–868.

© 2026 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>). The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

Izatullo N. Ganiev– Academician of National Academy of Sciences of Tajikistan, Doctor of Chemical Sciences, Professor of the Department of Chemical Production Technology, Tajik Technical University named after M.S. Osimi, e-mail: ganievizatullo48@gmail.com;

Gulmurod M. Atoev– Deputy Dean of the Faculty of Natural Sciences, Mathematics and Modern Technologies Dangara State University, e-mail: atozoda91@bk.ru;

Rustam D. Ismonov (Rustam D. Ismonzoda) – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Engineering Technology, Metal-cutting Machine Tools and Tools, Tajik Technical University named after M.S. Osimi, e-mail: ird-78@mail.ru;

Parvina N. Abdukholikova– Ph.D., senior researcher at the Institute of Chemistry named after V.I. Nikitin NAS of Tajikistan. Address: Republic of Tajikistan, Ph.D., senior researcher at the Institute of Chemistry named after V.I. Nikitin NAS of Tajikistan, e-mail: abdukholiqovap95@mail.ru;

Contribution of the authors:

Izatullo N. Ganiev – research problem statement; conceptualisation of research; drawing the conclusions; writing the text, research problem statement; scientific management; data collection; data analysis, reviewing the relevant literature; conceptualisation of research; data analysis; drawing the conclusions.

Gulmurod M. Atoev – formulation of the research problem, conceptualization of the study, conclusions, writing the text, scientific management, collection and theoretical analysis of data, review of relevant literature, experimental studies, processing and analysis of their results.

Rustam D. Ismonov – formulation of the research problem, conceptualization of the study, conclusions, writing the text, scientific management, collection and theoretical analysis of data, review of relevant literature, experimental studies, processing and analysis of their results.

Parvina N. Abdukholikova – formulation of the research problem, conceptualization of the study, conclusions, writing the text, scientific management, collection and theoretical analysis of data, review of relevant literature, experimental studies, processing and analysis of their results.

All authors have read and approved the final manuscript.

