

ISSN 1999-4125 (Print)

ISSN 2949-0642 (Online)

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

Научная статья

УДК 669.45.018.8.24/884

DOI: 10.26730/1999-4125-2025-3-91-100

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ТЕПЛОЕМКОСТИ И ИЗМЕНЕНИЙ
ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ СВИНЦОВОГО БАББИТА
Б(PbSb15Sn10), ЛЕГИРОВАННОГО ГАЛЛИЕМ

Изатулло Наврузович Ганиев *, Хайрулло Махмудхонович Ходжаназаров,
Шохин Худойдодович Саидов, Азиза Валиевна Амонова

Таджикский технический университет имени академика М. С. Осими

* для корреспонденции: ganiev48@mail.ru

**Информация о статье**

Поступила:

22 ноября 2024 г.

Одобрена после

рецензирования:

10 июня 2025 г.

Принята к публикации:

20 июня 2025 г.

Опубликована:

26 июня 2025 г.

Ключевые слова:

свинцовый баббит

Б(PbSb15Sn10), галлий, режим «охлаждения», теплоемкость, коэффициент теплоотдачи, энтальпия, энтропия, энергия Гиббса, температурная зависимость.

Аннотация.

Баббит на основе свинца, обладающий высокой теплопроводностью и отличным соответствием требованиям, обычно используется производителями в приложениях, которые будут подвергаться ударным нагрузкам. Некоторые изделия из баббита на основе свинца имеют однородную зернистую структуру, поэтому их можно использовать при больших нагрузках на низких постоянных скоростях. Баббит на основе свинца является экономичным сплавом, поскольку его можно использовать для машин общего назначения, линейных валов и механических мастерских. Его также можно использовать в сельскохозяйственной технике, цементном оборудовании, конвейерах, элеваторах и металлургическом оборудовании. Термодинамические и теплофизические свойства свинца и его сплавов являются предметом многочисленных экспериментальных и теоретических исследований. Имеющиеся экспериментальные данные включают измерения теплоемкости, энтальпии, энтропии и энергии Гиббса при нормальном давлении в диапазоне температуры 298,15–550 К. В работе приведены результаты исследования температурной зависимости удельной теплоемкости и изменений термодинамических функций свинцового баббита Б(PbSb15Sn10), легированного галлием в режиме «охлаждения» в диапазоне 298,15–550 К, для чего обработкой кривых скоростей охлаждения образцов из свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с галлием и эталона получены полиномы, описывающие их скорости охлаждения. Далее по экспериментально найденным величинам скоростей охлаждения эталона и образцов из сплавов, зная их массы, были установлены полиномы температурной зависимости теплоемкости сплавов и эталона, которые описываются четырехчленным уравнением. Используя интегралы от удельной теплоемкости, были установлены полиномы температурной зависимости изменений энтальпии, энтропии и энергии Гиббса для сплавов. Полученные зависимости показывают, что с ростом температуры и концентрации галлия теплоемкость, энтальпия и энтропия сплавов увеличиваются, а значения энергии Гиббса уменьшается.

Для цитирования: Ганиев И.Н., Ходжаназаров Х.М., Саидов Ш.Х., Амонова А.В. Температурная зависимость теплоемкости и изменений термодинамических функций свинцового баббита Б(PbSb15Sn10), легированного галлием // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2025. № 3 (169). С. 91-100. DOI: 10.26730/1999-4125-2025-3-91-100, EDN: JDZTRO

Введение

На сегодняшний день свинец занимает четвертое место по потреблению среди цветных металлов, уступая лишь алюминию, меди и цинку. Мировой объем использования свинца не уменьшается на протяжении последних лет. Основным свойством этого металла является высокая пластичность – его легко резать, ковать и прокатывать в листы желаемых размеров. Свинец и сплавы свинца широко используются в современной промышленности и отдельно, и в сочетании с другими веществами. Этот металл легко обрабатывается, обладает отличными литейными свойствами, но из-за невысокой прочности его применение в роли конструкционного материала весьма ограничено [1-3].

Свинец несложно сплавить с другими металлами, в результате образуются составы с новыми характеристиками, востребованные в промышленности.

Различают высоколегированные и низколегированные составы. Первые содержат различные добавки, которые делают полученный материал твердым и прочным. В низколегированных сплавах, наоборот, содержится совсем немного примесей, чаще всего это олово, кадмий или медь. Самыми востребованными сплавами, в состав которых входит свинец, являются пьютер, припой и баббиты [4, 5].

Баббиты представляют собой многокомпонентные составы, на 80 процентов состоящие из свинца. Также в них используют олово и сурьму. Эти материалы обладают невысоким коэффициентом трения и довольно большой рабочей температурой, что позволяет применять их для изготовления подшипников. Также пользуются популярностью свинцовые сплавы, включающие кадмий, ртуть, висмут и другие вещества, они активно используются в автомобилестроении и промышленности [6, 7].

Баббиты – искусственные сплавы металлов, обладающих разными химическими свойствами. Основу этих сплавов составляют металлы, которые имеют невысокую температуру плавления. К этим металлам относятся свинец, олово, мышьяк и сурьма. Поскольку одни элементы более мягкие, а другие более твердые, то получается специфический сплав, обладающий хорошими свойствами, позволяющими снижать коэффициент трения (так называемыми антифрикционными свойствами), износостойчивостью и долговечностью [8].

Свинцовый баббит Б(PbSb15Sn10) – металлический сплав, основу которого составляет свинец, его содержание в баббите может колебаться в диапазоне от 71.58% до 77% с присутствием сурьмы и олова. Свинцовый баббит Б(PbSb15Sn10) – мягкий сплав с относительно хорошими свойствами при ограниченной смазке, малой усталостью и прочностью; работает с твердым и мягким валом. Применяется для изготовления подшипникового слоя (литого, спеченного, накатанного) в многослойных тонкостенных подшипниках скольжения; для малонагруженных коренных и шатунных подшипников, вкладышей, упорных подшипников [9].

В связи с активным развитием современной техники существует потребность в создании материалов, надежно работающих в сложной комбинации силовых и температурных полей, при воздействии агрессивных сред и высоких давлений. Одним из эффективных путей решения этой задачи является создание конструкционных материалов с повышенной коррозионно-стойкостью, благодаря чему эти материалы приобретают качественно новые, зачастую уникальные свойства. Следует отметить, что разработка новых конструкционных материалов является в настоящее время ключевым направлением развития современного материаловедения [10, 11].

В литературе нет сведений о теплофизических и термодинамических свойствах свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с галлием. В связи с широким применением свинцовых баббитов в различных отраслях промышленности ведутся систематические научно-исследовательские работы по улучшению их эксплуатационных характеристик. В связи с отсутствием в литературе сведений о влиянии галлия на теплофизические свойства свинцового баббита нами он был выбран в качестве объекта исследования и подвергался модифицированию галлием. Полученные данные пополняют страницы соответствующих справочников и являются ценной информацией при выборе материала конструкций из свинцовых баббитов.

Материалы и методы исследования

Одним из методов, позволяющих корректно установить температурную зависимость теплоемкости металлов и сплавов в области высоких температур, является метод сравнения скоростей охлаждения двух образцов,

исследуемого и эталонного, по закону охлаждения Ньютона – Рихмана.

При охлаждении в равных условиях скорости охлаждения образцов из разных материалов соотносятся обратно пропорционально их теплоемкостям, а теплота кристаллизации пропорциональна времени кристаллизации. Для калибровки и перехода к абсолютным значениям теплоемкостей и теплоты плавления используется эталонный образец из материала известной теплоемкости.

Если взять два металлических стержня определенной формы, то, сравнивая кривые охлаждения (температуры как функции времени) этих образцов, один из которых служит эталоном (его теплоемкость и скорость охлаждения должны быть известны), можно определить теплоемкость другого, определив скорость его охлаждения.

Зная массы образцов m_1 и m_2 , скорости их охлаждений и удельную теплоемкость эталона C_{p1}^0 , можно вычислить теплоемкость исследуемого образца C_{p2}^0 по:

$$C_{p2}^0 = C_{p1}^0 \cdot \frac{m_1}{m_2} \cdot \frac{\left(\frac{dT}{dt}\right)_1}{\left(\frac{dT}{dt}\right)_2}, \quad (1)$$

где $m_1 = \rho_1 V_1$ – масса образца из эталона;

$m_2 = \rho_2 V_2$ – масса исследуемого образца;

$\left(\frac{dT}{dt}\right)_1, \left(\frac{dT}{dt}\right)_2$ – скорости охлаждения образцов из эталона и исследованных сплавов при данной температуре.

Правомочность использования данного уравнения для определения теплоемкости твердых тел представлена в работах [12–15].

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

Исследование теплоемкости и изменений

термодинамических функций свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с галлием проводили по методике, описанной в работах [16–20].

Исследование теплоемкости металлов проводилось на установке, схема которой представлена на Рис. 1. Схема установки для измерения теплоемкости твердых тел включает узлы: электропечь (3), смонтированная на стойке (6), по которой она может перемещаться вверх и вниз. Образец (4) и эталон (5) (тоже могут перемещаться) представляют собой цилиндр длиной 30 мм и диаметром 16 мм с высверленными каналами с одного конца, в которые вставлены термопары. Концы термопар подведены к цифровому термометру «Digital Multimeter DI9208L» (7, 8 и 9).

Электропечь запускается через лабораторный автотрансформатор (ЛАТР) (1) с установкой нужной температуры с помощью терморегулятора (2). По показаниям цифровых термометров фиксируется значение начальной температуры. 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 цифрового термометра на компьютер через каждые 10 с до охлаждения температуры образца и эталона ниже 308 К (35°C).

В связи с тем, что промышленностью не выпускается свинцовый баббит Б(PbSb15Sn10) по ГОСТ 1320-74 (ИСО 4383-91) с галлием, нами синтез данного сплава проводился в шахтной лабораторной печи СШОЛ при температуре 723–773 К путем совместной плавки свинца марки С00 (99,99% Pb) ГОСТ 3778-77, олова марки ОВЧ-000 (99,999% Sn) ГОСТ 860-75, сурьмы

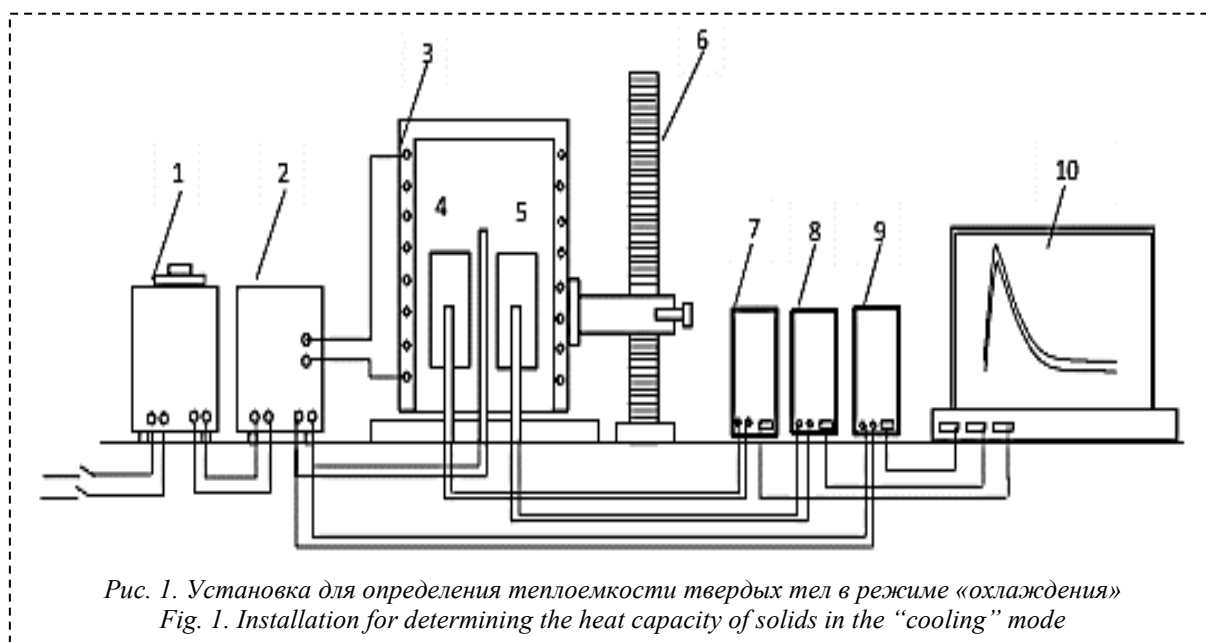


Рис. 1. Установка для определения теплоемкости твердых тел в режиме «охлаждения»
Fig. 1. Installation for determining the heat capacity of solids in the "cooling" mode

металлической марки Сy00 (99,9% Sb) ГОСТ 1089-82 и галлия марки Гл-1 (99,9% Ga) ГОСТ 12797-77. Содержание галлия в исходном сплаве составило 0,01; 0,1; 0,5; 1,0 мас. %. Из полученных сплавов отливались цилиндрические образцы диаметром 16 мм, длиной 30 мм в графитовую изложницу заданной формы для исследования теплоемкости. Состав сплавов контролировался взвешиванием шихты и полученных сплавов. В случае отклонения массы образцов более чем на 2% синтез сплавов проводился заново.

Экспериментально полученные кривые охлаждения образцов из свинцового баббита Б (PbSb15Sn10), с галлием представлены на Рис. 2а. Шаг измерения температуры составил 0,1 К. Временной интервал фиксации температуры составлял 10 с. Относительная ошибка измерения теплоемкости в интервале от 313 К до 673 К составляла $\pm 1\%$, а в интервале более 673 К $\pm 2,5\%$. Погрешность измерения теплоемкости по предлагаемой методике не превышает 4%. В

нашем случае погрешность не превышала 1,5%. Вся обработка результатов производилась по программе MS Excel и графики строились с помощью программы Sigma Plot 10.0. Коэффициент корреляции составил не менее 0,999.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Полученные кривые охлаждения образцов из указанных сплавов (Рис. 2а) описываются уравнением вида

$$T = ae^{-b\tau} + pe^{-k\tau}, \quad (2)$$

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

Дифференцируя уравнение (2) по τ , получаем уравнение для определения скорости охлаждения образцов из сплавов

$$\frac{dT}{d\tau} = -abe^{-b\tau} - pke^{-k\tau}. \quad (3)$$

Значения коэффициентов a , b , p , k , ab , pk в уравнении (3) для исследованных образцов приведены в Таблице 1. Кривые зависимости

Таблица 1. Значения коэффициентов a , b , p , k , ab , pk в уравнении (8) для свинцового баббита Б (PbSb15Sn10) с галлием, и эталона (Pb марки C00)

Table 1. Values of coefficients a , b , p , k , ab , pk in equation (8) for lead babbitt B (PbSb15Sn10) with gallium and the standard (Pb grade C00)

Содержание галлия в баббите, мас. %	a , К	$b \cdot 10^{-3}$, c^{-1}	p , К	$k \cdot 10^{-5}$, c^{-1}	$a \cdot b$, Kc^{-1}	$pk \cdot 10^{-3}$, $K \cdot c^{-1}$
0,0	264,4384	8,87	309,6798	2,77	2,34	8,59
0,01	264,4438	8,87	306,8874	2,80	2,35	8,60
0,1	264,4440	8,87	308,2872	2,79	2,35	8,60
0,5	264,4402	8,87	309,1822	2,78	2,35	8,60
1,0	264,4384	8,87	310,0797	2,77	2,34	8,59
Эталон	264,4382	8,87	308,6799	2,78	2,34	8,59

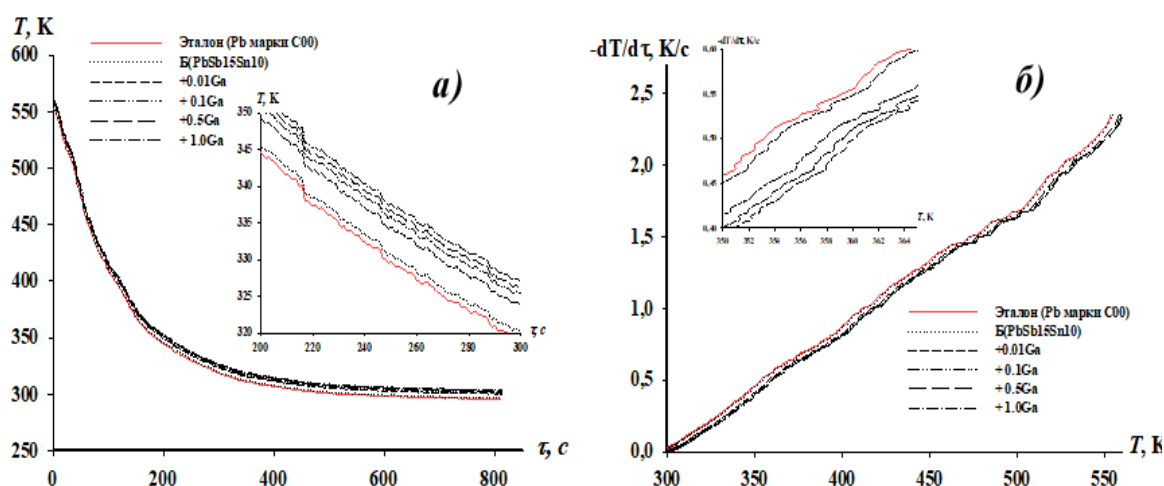


Рис. 2. График зависимости температуры от времени охлаждения (а) и скорости охлаждения от температуры (б) для образцов из свинцового баббита Б (PbSb15Sn10), легированного галлием, и эталона (Pb марки C00)

Fig. 2. Graph of temperature versus cooling time (a) and cooling rate versus temperature (b) for samples of lead babbitt B (PbSb15Sn10) doped with gallium and a reference (Pb grade C00)

скорости охлаждения от температуры для образцов из свинцового баббита Б (PbSb15Sn10), легированного галлием, представлены на Рис. 26.

Далее по рассчитанным значениям величин скоростей охлаждения образцов из сплавов по уравнению (1) была вычислена удельная теплоемкость свинцового баббита Б (PbSb15Sn10) с галлием. Затем, проведя полиномиальную регрессию, получили следующее общее уравнение для описания температурной зависимости теплоемкости сплавов:

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

Значения коэффициентов уравнения (4) температурной зависимости теплоемкости для свинцового баббита Б (PbSb15Sn10), легированного галлием, представлены в Таблице 2.

Результаты расчета температурной зависимости теплоемкости для баббита Б (PbSb15Sn10) с галлием по формулам (1) и (4) через 50 К представлены в Таблице 3 и на Рис. 3а. Как видно, с ростом температуры и содержания галлия теплоемкость сплавов растет.

С использованием рассчитанных значений теплоемкости и экспериментально полученных величин скоростей охлаждения образцов нами был вычислен коэффициент теплоотдачи $\alpha(T)$ для свинцового баббита Б (PbSb15Sn10) с

галлием по формуле

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

где T и T_0 – температура образца и окружающей среды, S и m – площадь поверхности и масса образца соответственно.

На Рис. 3б приведены результаты расчета коэффициента теплоотдачи свинцового баббита Б (PbSb15Sn10) с галлием в зависимости от температуры. Добавка галлия и температура увеличивают коэффициент теплоотдачи баббита Б (PbSb15Sn10).

Для расчета температурной зависимости изменений энтальпии, энтропии и энергии Гиббса для свинцового баббита Б (PbSb15Sn10) с галлием были использованы интегралы от удельной теплоемкости по уравнению (4):

$$[H^0(T) - H^0(T_0)] = \alpha(T - T_0) + \frac{b}{2}(T^2 - T_0^2) + \frac{c}{3}(T^3 - T_0^3) + \frac{b}{4}(T^4 - T_0^4); \quad (6)$$

$$[S^0(T) - S^0(T_0)] = a \ln \frac{T}{T_0} + \frac{b}{2}(T - T_0) +$$

$$\frac{c}{2}(T^2 - T_0^2) + \frac{b}{3}(T^3 - T_0^3); \quad (7)$$

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

где $T_0 = 298,15$ К.

Таблица 2. Значения коэффициентов a , b , c , d в уравнении (4) для свинцового баббита Б (PbSb15Sn10), легированного галлием, и эталона (Pb марки C00)

Table 2. Values of coefficients a , b , c , d in equation (4) for lead babbitt B (PbSb15Sn10), doped with gallium, and the standard (Pb grade C00)

Содержание галлия в сплаве, мас. %	a , Дж/(кг·К)	b , Дж/(кг·К ²)	$c \cdot 104$, Дж/(кг·К ³)	$d \cdot 107$, Дж/(кг·К ⁴)	Коэффициент корреляции R ²
0,0	150,5740	-0,0852	3,65	-2,97	0,999
0,01	150,5399	-0,0833	3,61	-294	0,999
0,1	150,5801	-0,0760	3,44	-283	0,999
0,5	150,4974	-0,0667	3,24	-268	0,999
1,0	150,5734	-0,0483	2,82	-240	0,999
Эталон	150,5734	-0,0483	2,82	-240	1,00

Таблица 3. Температурная зависимость удельной теплоемкости (Дж/(кг·К)) свинцового баббита Б (PbSb15Sn10), легированного галлием, и эталона (Pb марки C00)

Table 3. Temperature dependence of specific heat (J/(kg·K)) lead babbitt B (PbSb15Sn10), doped with gallium, and a reference (Pb grade C00)

Содержание галлий в сплаве мас. %	Т.К						Рост C_p^0 , %
	300	350	400	450	500	550	
0,0	149,84	152,73	155,88	159,08	162,09	164,71	9,02
0,01	150,10	153,00	156,16	159,37	162,39	165,01	9,03
0,1	151,09	153,99	157,11	160,25	163,21	165,77	8,85
0,5	152,41	155,35	158,51	161,67	164,65	167,23	8,86
1,0	154,98	157,92	161,01	164,07	166,92	169,38	8,50
Рост C_p^0 , %	3,32	3,29	3,19	3,04	2,41	2,71	-
Эталон	127,50	130,23	132,80	135,24	137,60	139,90	8,86

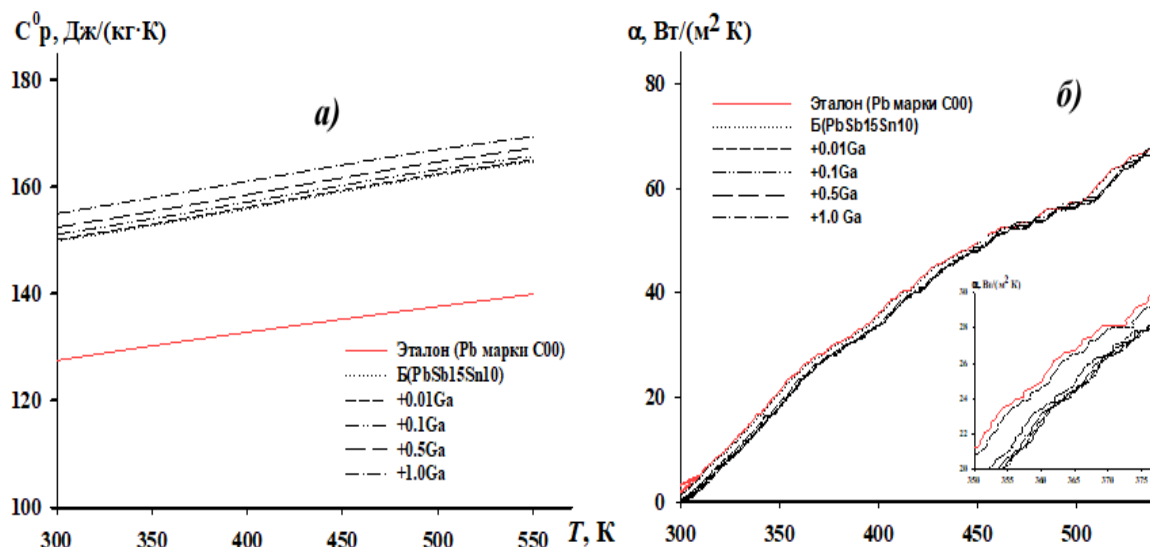


Рис. 3. Температурная зависимость теплоемкость (а) и коэффициента теплоотдачи (б) свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с галлием и эталона (Pb марки C00)

Fig. 3. Temperature dependence of the heat capacity (a) and heat transfer coefficient (b) of lead babbitt B (PbSb15Sn10) with gallium and the standard (Pb grade C00)

Таблица 4. Температурная зависимость изменений термодинамических функций свинцового баббита Б(PbSb15Sn10), легированного галлием, и эталона

Table 4. Temperature dependence of changes in the thermodynamic functions of gallium-doped lead babbitt B (PbSb15Sn10) and the standard

(Pb марки C00)

Т, К	Эталон	Содержание галлия в сплаве, мас. %				
		0,0	0,01	0,1	0,5	1,0
	Энтальпия $[H^0(T) - H^0(T_0)]$, кДж/кг для сплавов					
300	0,23578	0,23578	0,277596	0,279441	0,281867	0,286623
350	6,67981	6,67981	7,853649	7,905162	7,974643	8,108293
400	13,25619	13,25619	15,58217	15,68199	15,82061	16,08146
450	19,95773	19,95773	23,47072	23,61634	23,82538	24,20913
500	26,77911	26,77911	31,51584	31,70399	31,98455	32,4853
550	33,7169	33,7169	39,70305	39,93014	40,28362	40,89497
Энтропия $[S^0(T) - S^0(T_0)]$, кДж/(кг·К) для сплавов						
300	0,000788	0,000788	0,000928	0,000934	0,000942	0,000958
350	0,020650	0,020650	0,02428	0,024439	0,024654	0,025067
400	0,038209	0,038209	0,044915	0,045203	0,045603	0,046356
450	0,053993	0,053993	0,063494	0,06389	0,064455	0,065498
500	0,068365	0,068365	0,080444	0,080930	0,081646	0,082935
550	0,081588	0,081588	0,096048	0,096609	0,097463	0,098964
Энергия Гиббса $[G^0(T) - G^0(T_0)]$, кДж/кг для сплавов						
300	-0,00073	-0,00073	-0,00086	-0,00087	-0,00087	-0,00089
350	-0,54769	-0,54769	-0,64418	-0,64843	-0,65411	-0,66511
400	-2,02751	-2,02751	-2,38376	-2,39929	-2,42041	-2,46079
450	-4,33911	-4,33911	-5,10152	-5,13425	-5,17955	-5,26502
500	-7,40333	-7,40333	-8,70607	-8,76094	-8,83832	-8,98226
550	-11,1565	-11,1565	-13,1235	-13,2046	-13,3213	-13,5351

Результаты расчета изменений основных термодинамических функций свинцового баббита $B(PbSb15Sn10)$, легированного галлием, представлены в Таблице 4.

Выводы

1. Получены полиномы температурной зависимости теплоемкости и изменений термодинамических функций (энтальпия, энтропия и энергия Гиббса) для свинцового баббита $B(PbSb15Sn10)$ с галлием, которые с коэффициентом корреляции $R_{кор.} = 0,999$ описывают их изменения.

2. Результаты исследования теплоемкости и изменений термодинамических функций свинцового баббита $B(PbSb15Sn10)$ с галлием показывают, что легирующий компонент в изученном концентрационном интервале (0,01 - 1,0 мас. %) увеличивает теплоемкость, коэффициент теплоотдачи, энтальпию и энтропию исходного сплава. При этом значение энергии Гиббса сплавов уменьшается.

Установленные теплофизические и термодинамические характеристики свинцового баббита $B(PbSb15Sn10)$ с галлием дополняют страницы соответствующих справочников и могут использоваться при проектировании изделий из них.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров В. М. Материаловедение и технология конструкционных материалов. Учебное пособие. Часть 1. Материаловедение, Архангельск: Северный (Арктический) Федеральный университет. 2015. 327 с.
2. Лужникова Л. П. Материалы в машиностроении, Т. 1. Цветные металлы и сплавы. М.: 1967. 287 с.
3. Хайрулин Р. А., Станкус С. В., Кошелева А. С. Взаимная диффузия в расплавах системы олово-свинец эвтектического и около эвтектического составов // Теплофизика высоких температур. 2008. Т. 46. № 2. С. 239–245.
4. Семенов А. П. Антифрикционные материалы: опыт применения и перспективы. Трение и смазка в машинах и механизмах // Машиностроение. 2007. № 12. С. 21–36.
5. ГОСТ 1320-74. Баббиты оловянные и свинцовые. Технические условия. М.: ИПК Издательство стандартов, 2001.
6. Шелег В. К., Леванцевич М. А., Пилипчук Е. В., Кравчук М. А., Богданович И. А., Богданова Т. Я. Легирование расплава подшипников скольжения на основе баббита // Наука и техника. 2020. Т. 19. № 6. С. 475–479.
7. Потехин Б. А., Илюшин В. В., Христолюбов А. С. Влияние способов литья на структуру и свойства оловянного баббита // Металлургия. 2009. № 8. С. 16–21.
8. Зернин М. В., Яковлев А. В. К

исследованию усталостной долговечности баббитового слоя тяжело нагруженных подшипников скольжения // Заводская лаборатория. 1997. № 11. С. 39–47.

9. Бешевли О. Б., Дуюн Т. А. Особенности теплового состояния баббитов при механической обработке // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2010. № 2 (85). С. 75–81.

10. Чуев К. В., Бешевли О. Б., Дуюн Т. А. Моделирование теплового состояния баббита в процессе фрезерования // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2010. № 2 (85). С. 96–101.

11. Jauch U., Haase G., Karcher V., Schulz B. Thermophysical properties in the system Li-Pb. Pt. I–III // Kernforschungszentrum Karlsruhe Report 4144. 1986. 82 p.

12. Киров С. А., Козлов А. В., Салецкий А. М., Харабадзе Д. Э. Измерение теплоемкости и теплоты плавления методом охлаждения. Учебное пособие. М.: ООП Физический факультета МГУ им. М. В. Ломоносова, 2022. 26 с.

13. Тарсин А. В., Костерин К. С. Определение теплоемкости металлов методом охлаждения. Лабораторные занятия. Ухта: Ухтинский государственный технический университет, 2014. 98 с.

14. 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. 115 с.

15. 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.

16. Ганиев И. Н., Ходжаназаров Х. М., Ходжаев Ф. К., Эшов Б. Б. Теплоемкость и термодинамические функции свинцового баббита БН_а ($PbSb15Sn10Na$), легированного натрием // Журнал физической химии. 2023. № 4. С. 469–475.

17. Ганиев И. Н., Ходжаназаров Х. М., Ходжаев Ф. К., Эшов Б. Б. Температурная зависимость теплоемкости и изменений термодинамических функций свинцового баббита БЛ_и ($PbSb15Sn10Li$), легированного литием // Металлург. 2023. № 2. С. 101–106.

18. Ганиев И. Н., Одинаев А. Х., Ходжаев Ф. К., Ходжаназаров Х. М. Влияние стронция на теплоемкость и термодинамические функции свинцового баббита БСт ($PbSb15Sn10Sr$) // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). 2023. № 67 (93). С. 28–33.

19. Ганиев И. Н., Одиназова Х. О.,

Ходжаев Ф. К., Ходжаназаров Х. М. Теплоемкость и термодинамические свойства свинцового баббита БК (PbSb15Sn10K), модифицированного калием в области 300...550 К // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2023. № 5. С. 7–15.

20. Ганиев И. Н., Ходжаев Ф. К., Одинаев А. Х., Ходжаназаров Х. М. Влияние бария на теплофизические свойства и термодинамические функции свинцового баббита Б (PbSb15Sn10) // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2024. № 1 (100). С. 76–88.

© 2025 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, доктор химических наук, профессор кафедры «Технология химических производств», Таджикский технический университет имени М. С. Осими (734042, Республика Таджикистан, г. Душанбе, проспект академиков Раджабовых, 10, e-mail: ganievizatullo48@gmail.com).

Ходжаназаров Хайрулло Махмудхонович – к.т.н., старший преподаватель кафедры «Метрология, стандартизация и сертификация», Таджикский технический университет имени М. С. Осими (734042, Республика Таджикистан, г. Душанбе, проспект академиков Раджабовых, 10, Тел.: (+992) 907-60-60-73, e-mail: khayrullo.khodzhanazarov@bk.ru);

Саидов Шохин Худойдодович – ассистент кафедры «Технология химических производств», Таджикский технический университет имени М. С. Осими (734042, Республика Таджикистан, г. Душанбе, проспект академиков Раджабовых, 10; e-mail: male_lion94@mail.ru., Тел.: (+992)985-11-80-00);

Амонова Азиза Валиевна – к.х.н., доцент кафедры «Технология химических производств», Таджикский технический университет имени М. С. Осими (734042, Республика Таджикистан, г. Душанбе, проспект академиков Раджабовых, 10, e-mail: amonovaaziza@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.

Ходжаназаров Хайрулло Махмудхонович – 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.

Саидов Шохин Худойдодович – 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.

Амонова Азиза Валиевна – 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

TEMPERATURE DEPENDENCE OF THERMAL CAPACITY AND CHANGES IN THERMODYNAMIC FUNCTIONS OF LEAD BABBITTE B(PbSb15Sn10) ALLOYED WITH GALLIUM

Izatullo N. Ganiev, Khairullo M. Khojanazarov,
Shokhin Kh. Saidov, Aziza V. Amonova

Tajik Technical University named after academician M.S. Osimi

* for correspondence: ganiev48@mail.ru



Article info

Received:

22 November 2024

Accepted for publication:

10 June 2025

Accepted:

20 June 2025

Published:

26 June 2025

Keywords: lead babbitt

B(PbSb15Sn10), gallium,

"cooling" mode, heat capacity,

heat transfer coefficient,

enthalpy, entropy, Gibbs energy,

temperature dependence.

Abstract.

Lead-based babbitt, which has high thermal conductivity and excellent compliance, is commonly used by manufacturers in applications that will be subject to impact loads. Some lead-based babbitt products have a uniform grain structure, so they can be used for heavy loads at low constant speeds. Lead-based babbitt is an economical alloy because it can be used for general-purpose machinery, line shafts, and machine shops. It can also be used in agricultural machinery, cement equipment, conveyors, elevators, and metallurgical equipment. The thermodynamic and thermal properties of lead and its alloys are the subject of numerous experimental and theoretical studies. The 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. The paper presents the results of a study of the temperature dependence of the specific heat and changes in the thermodynamic functions of lead babbitt *B(PbSb15Sn10)* alloyed with gallium in the "cooling" mode in the range of 298.15–550 K. For this purpose, polynomials describing the cooling rates of lead babbitt *B(PbSb15Sn10)* samples with gallium and the standard were obtained by processing the cooling rate curves of the samples. Further, according to the experimentally found values of the cooling rates of the standard and the samples from the alloys, knowing their masses, polynomials of the temperature dependence of the heat capacity of the alloys and the standard were established, which are described by a four-term equation. Using integrals of specific heat capacity, polynomials of temperature dependence of changes in enthalpy, entropy and Gibbs energy for alloys were established. The obtained dependencies show that with increasing temperature and gallium concentration, heat capacity, enthalpy and entropy of alloys increase, and the values of Gibbs energy decrease.

For citation: Ganiev I.N., Khojanazarov Kh.M., Saidov Sh.Kh., Amonova A.V. Temperature dependence of thermal capacity and changes in thermodynamic functions of lead babbite *B(PbSb15Sn10)* alloyed with gallium. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2025; 3(169):91-100. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2025-3-91-100, EDN: JDZTRO

REFERENCES

- Alexandrov V.M. Materials science and technology of structural materials. Tutorial. Part 1. Materials Science, Arkhangelsk: Northern (Arctic) Federal University. M.: 2015. 327 p.
- Luzhnikova L.P. Materials in mechanical engineering, T. 1. Non-ferrous metals and alloys. M.: 1967. 287 p.
- Khairullin R.A., Stankus S.V., Kosheleva A.S. Mutual diffusion in melts of the tin-lead system of eutectic and near-eutectic compositions. *High Temperature Thermophysics*. 2008; 46:239–245.
- Semenov A.P. Antifriction materials: application experience and prospects. Friction and lubrication in machines and mechanisms. *Mechanical engineering*. 2007; 12:21–36.
- GOST 1320-74. Tin and lead babbitts. Technical conditions. M.: IPK Publishing House of Standards; 2001.
- Sheleg V.K., Levantsevich M.A., Pilipchuk E.V., Kravchuk M.A., Bogdanovich I.A., Bogdanova T.Ya. Alloying of babbitt-based plain bearing melt. *Science and Technology*. 2020; 19(6):475–479.
- Potekhin B.A., Ilyushin V.V., Khristolyubov A.S. Influence of casting methods on the structure and properties of tin babbitt. *MiTOM*. 2009; 8:16–21.
- Zernin M.V., Yakovlev A.V. On the study of fatigue life of the babbitt layer of heavily loaded plain bearings. *Factory Laboratory*. 1997; 11:39–47.
- Beshevli O.B., Duyun T.A. Features of the thermal state of babbitts during mechanical processing. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2010; 2(85):75–81.
- Chuev K.V., Beshevli O.B., Duyun T.A. Modeling the thermal state of babbitt during milling. *Bulletin of BSTU named after V.G., Shukhov*. 2010; 2(85):96–101.
- Jauch U., Haase G., Karcher V., Schulz B. Thermophysical properties in the system Li-Pb. Pt. I-III. *Kernforschungszentrum Karlsruhe Report*. 4144. 1986. 82 p.
- Kirov S.A., Kozlov A.V., Saletsky A.M., Kharabadze D.E. Measurement of heat capacity and heat

of fusion by cooling. Study guide M.: OOP Physics Faculty of Moscow State University M.V. Lomonosov; 2022. 26 p.

13. Tarsin A.V., Kosterin K.S. Determination of heat capacity of metals by cooling method. Laboratory classes. Ukhta: Ukhta State Technical University; 2014. 98 p.

14. Rogachev N.M., Guseva S.I. Determination of specific heat capacity of solids: Method. instructions for laboratory work № 1-23. Samara: Samara State Aerospace University named after Academician S.P. Korolev; 2012. 115 p.

15. Bodryakov V.Yu. On the correlation of temperature dependences of thermal expansion and heat capacity up to the melting point of a refractory metal: molybdenum. *High Temperature Thermal Physics*. 2014; 52(6):863–868.

16. Ganiev I.N., Khodzhazarov H.M., Khodzhaev F.K., Eshov B.B. Heat capacity and thermodynamic functions of lead babbitt BNa (PbSb15Sn10Na) doped with sodium. *Journal of Physical Chemistry*. 2023; 4:469–475.

17. Ganiev I.N., Khodzhazarov H.M., Khodzhaev F.K., Eshov B.B. Temperature dependence of heat capacity and changes in thermodynamic functions of lead babbitt BLi (PbSb15Sn10Li) alloyed with lithium. *Metallurgist*. 2023; 2:101–106.

18. Ganiev I.N., Odinaev A.Kh., Khodjaev F.K., Khodzhazarov H.M. Effect of strontium on the heat capacity and thermodynamic functions of lead babbitt BSt (PbSb15Sn10Sr). *Bulletin of the St. Petersburg State Technological Institute (Technical University)*. 2023; 67(93):28–33.

19. Ganiev I.N., Odinzoda H.O., Khodjaev F.K., Khodjanazarov H.M. Heat capacity and thermodynamic properties of lead babbitt BK (PbSb15Sn10K) modified with potassium in the range of 300...550 K. *Forging and stamping production. Processing of materials by pressure*. 2023; 5:7–15.

20. Ganiev I.N., Khodjaev F.K., Odinaev A.Kh., Khodjanazarov H.M. Effect of barium on the thermophysical properties and thermodynamic functions of lead babbitt B (PbSb15Sn10). *Bulletin of the Saratov State Technical University*. 2024; 1(100):76–88.

© 2025 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:

Ganiev Izatullo Navruzovich – academician, doctor of chemical sciences, professor of the department of "Technology of chemical production", Tajik Technical University named after M.S. Osimi (734042, Republic of Tajikistan, Dushanbe, Academician Radjabov Avenue, 10, e-mail: ganievizatullo48@gmail.com);

Khodzhazarov Khairullo Makhmudkhonovich – Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer, Department of Metrology, Standardization and Certification, Tajik Technical University named after M.S. Osimi (734042, Republic of Tajikistan, Dushanbe, Academician Radjabov Avenue, 10, Tel.: (+992) 907-60-60-73, e-mail: khayrullo.khodzhazarov@bk.ru);

Saidov Shohin Khudoydodovich – assistant of the department of "Technology of chemical production", Tajik Technical University named after M.S. Osimi (734042, Republic of Tajikistan, Dushanbe, Academician Radjabov Avenue, 10; e-mail: male_lion94@mail.ru, Tel.: (+992)985-11-80-00);

Amonova Aziza Valievna – candidate of chemical sciences, Associate Professor of the Department of Chemical Production Technology, Tajik Technical University named after M.S. Osimi (734042, Republic of Tajikistan, Dushanbe, Academician Radjabov Avenue, 10, e-mail: amonovaaziza@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.

Khayrullo Mahmudkhonovich Khojanazarov – 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 research, processing and analysis of their results.

Saidov Shohin Khudoydodovich – 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.

Amonova Aziza Valievna – 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.

