

*И.Н. Ганиев<sup>1</sup>, А.Г. Сафаров<sup>2</sup>, Ф.Р. Одинаев<sup>2</sup>, К. Кабутов<sup>2</sup>, К. Ботуров<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Институт химии им. В.И. Никитина АН Республики Таджикистан

<sup>2</sup>Физико-технический институт им. С.У. Умарова АН Республики Таджикистан

## ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ТЕПЛОЕМКОСТИ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АЖ4.5, ЛЕГИРОВАННОГО СВИНЦОМ

Развитие современной науки и техники предъявляет все возрастающие требования к уровню эффективности, качества и разнообразия свойств изделий из цветных металлов. В современных материалах должны сочетаться их высокие механические и технологические свойства и качества для обеспечения необходимых ресурсов и надежности работы изделий, авиационно-космической техники, машиностроения, атомной энергетики, радиотехники, электроники и т.д. В связи с этим особое значение приобретает производство и использование алюминия и его сплавов, обладающих высокой коррозионной и механической стойкостью, а также рядом других специфических свойств.

Особый интерес для современного машиностроения представляют высокопрочные литейные алюминиевые сплавы со свойствами идентичных деформируемых сплавов. Основным фактором, определяющим механические и технологические свойства литейного сплава, является его состав, в том числе и содержание нейтральных и вредных примесей и газов, зависящее от технологии плавки, а также состава исходных материалов, плавки и флюсов [1 – 3].

Железо является преобладающей примесью технического алюминия, а также основной примесью чистого алюминия. Железо часто попадает в алюминий при использовании стальной оснастки при плавке и литье, а также при «замешивании» расплава. Железо добавляют исключительно как вспомогательный элемент для того, чтобы литейный сплав легко отставал от стенок формы.

Технический алюминий с повышенным содержанием железа не находит применения на практике в связи с целым рядом недостатков. Прежде всего – это низкие пластичность и коррозионная стойкость, неудовлетворительная электропроводность и т.д. Поэтому такой металл не находит применения за исключением того, что частично используется для раскисания и дегазации стали. Иногда для того, чтобы улучшить

сортность такого металла, проводится перемешивание с более чистым металлом из другой ванны.

Цель настоящей работы заключается в том, чтобы получить из низкосортного алюминия с повышенным содержанием железа сплав, который отличался бы более приемлемыми характеристиками и мог использоваться, в частности, как анодный материал для защиты от коррозии стальных конструкций и сооружений.

Теплоемкость представляет собой одно из важнейших физических свойств твердых тел, характеризующее изменение состояния вещества с температурой. Изучение теплоемкости является одним из основных методов исследования структурных и фазовых превращений в сплавах. По температурной зависимости теплоемкости можно определить другие физические характеристики твердого тела: температуру и тип фазового превращения, температуру Дебая, энергию образования вакансий, коэффициент электронной теплоемкости и др. [4]. Данные о зависимости термодинамических свойствах сплавов Al + 4,5 % Fe + Pb от температуры в литературе отсутствуют.

В общем случае теплоемкость весьма сложным образом может зависеть от способа изменения температуры вещества. Для газов, например, существенно, ведется ли нагревание (охлаждение) при постоянном объеме или при постоянном давлении. Зависимость теплоемкости от температуры также сложная. Выбор конкретной физической модели, объясняющей ход зависимости  $C_p^0(T)$ , может быть связан с агрегатным состоянием вещества (газ, твердое тело, жидкость), диапазона температуры исследований и т.д. В частности, для металлов с простыми кристаллическими решетками и в определенном диапазоне температур (не слишком низких и не слишком высоких) достаточно хорошо «работает» теория Дебая. Однако к телам более сложной структуры формула Дебая не применима. С достаточной для современных прикладных рас-

четов степень точности теплоемкость может быть определена только экспериментально [4].

Получение значений теплоемкости при произвольной температуре для произвольного материала является сложной и в то же время очень важной научно-технической задачей. Одним из методов, позволяющих корректно установить температурную зависимость теплоемкости металлов, является метод сравнения скоростей охлаждения двух образцов (исследуемого и эталонного) по закону охлаждения Ньютона – Рихмана.

В настоящей работе используется оригинальный метод, который основан на принципе определения удельной теплоемкости какого-либо образца по известной удельной теплоемкости другого образца (эталона) при высоких температурах. Необходимые условия для выполнения работы были такие, чтобы тела нагревались и охлаждались в строго определенных, одинаковых температурных интервалах, имели близкие коэффициенты теплоотдачи, одинаковую форму и площадь поверхности, иначе определение удельной теплоемкости является некорректным.

Образцы изготавливались в виде небольших цилиндров из исследуемых сплавов и металла (эталона), температурная зависимость теплоемкости которого известна. Каждый из них нагревали до достаточно высокой температуры, а затем давали возможность остывать, при этом записывали температуру через определенные отрезки времени, т.е. снимали кривую охлаждения. Условия, в которых происходит остывание образцов, должны быть одинаковыми.

Теория нагрева тонких изделий освещена в работах [5,6]. С учетом этих работ расчет теплоемкости проводили по уравнению

$$C_p^0 m \frac{dT}{d\tau} = \alpha(T - T_0)S, \quad (1)$$

где  $m = \rho V$  – масса образца;  $\rho$  и  $V$  – плотность и объем образца;  $\frac{dT}{d\tau}$  – скорость охлаждения образца;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи;  $S$  – площадь образца.

Соотношение (1) для двух образцов одинакового размера при допущении, что  $S_1 = S_2$ ,  $\alpha_1 = \alpha_2$ , запишется так:

$$C_{R1}^0 = C_{P2}^0 \frac{m_1}{m_2} \frac{\left(\frac{dT}{d\tau}\right)_1}{\left(\frac{dT}{d\tau}\right)_2}, \quad (2)$$

здесь индекс «1» отнесется к первому образцу; индекс «2» – ко второму.

Для определения теплоемкости строятся кривые охлаждения исследуемых образцов и эталона (Cu). Кривая охлаждения представляет собой зависимость температуры образца от времени при охлаждении его на воздухе.

Передача тепла от более нагретого тела к менее нагретому – это процесс, стремящийся к установлению термодинамического равновесия в системе, состоящей из огромного числа частиц, т.е. это релаксационный процесс, который можно описать временной экспонентой. В нашем случае нагретое тело передает свое тепло окружающей среде (т.е. телу с бесконечно большой теплоемкостью). Поэтому температуру окружающей среды ( $T_0$ ) можно считать постоянной. Тогда закон изменения температуры тела от времени  $\tau$  можно записать в виде  $\Delta T = \Delta T_1 e^{-\tau/\tau_1}$ , где  $\Delta T$  – разность температур нагретого тела и окружающей среды;  $\Delta T_1$  – разность температур нагретого тела и окружающей среды при  $\tau = 0$ ;  $\tau_1$  – постоянная охлаждения, численно равная времени, в течение которого разность температур между нагретым телом и окружающей средой уменьшается в  $e$  раз.

Целью настоящей работы является определение удельной теплоемкости и изменения термодинамических функций сплава АЖ4.5, легированного свинцом, по известной удельной теплоемкости эталонного образца из меди. Сплав АЖ4.5 извлекли непосредственно из электролизера алюминиевой компании ГУП ТАЛКо.

Для получения тройных сплавов сплав АЖ4.5 легировали металлическим свинцом марки «чистый» в шахтных лабораторных печах типа СШОЛ при 850 – 900 °С. Содержание свинца в сплавах варьировали в пределах 0,05 – 1,00 % (по массе). Химический состав сплавов контролировали на квантометре в центральной заводской лаборатории ГУП ТАЛКо. Из полученных сплавов отливали цилиндрические образцы диам. 16 и длиной 30 мм в графитовую изложницу заданной формы для исследования теплоемкости.

Теплоемкость измеряли на установке, схема которой представлена на рис. 1. Установка состоит из следующих узлов: электропечь 3 смонтирована на стойке 6, по которой она может перемещаться вверх и вниз (стрелкой показано направление перемещения). Образец 4 и эталон 5, которые тоже могут перемещаться, представляют собой цилиндр длиной 30 и диам. 16 мм с высверленными каналами с одного конца, в которые вставлены термопары. Концы термопар подведены к цифровому многоканальному термометру 7, который подсоединен к компьютеру 8.

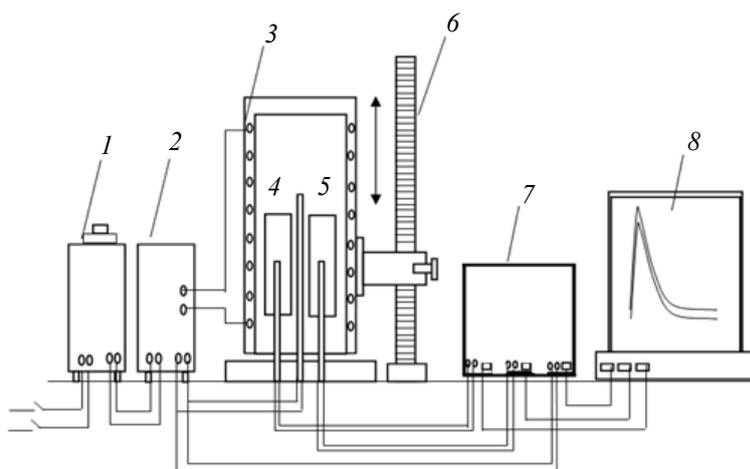


Рис. 1. Установка для определения теплоемкости твердых тел в режиме «охлаждения»: 1 – автотрансформатор; 2 – терморегулятор; 3 – электропечь; 4 – измеряемый образец; 5 – эталон; 6 – стойка электропечи; 7 – многоканальный цифровой термометр; 8 – регистрирующий прибор (компьютер)

Включаем электропечь 3 через автотрансформатор 1, установив нужную температуру с помощью терморегулятора 2. По показаниям цифрового многоканального термометра 7 отмечаем значение начальной температуры. Образец 4 и эталон 5, у которых измеряем теплоемкость, помещали в электропечь 3 и нагреваем до нужной температуры, контроль которой осуществляли по показаниям цифрового многоканального термометра на компьютере 8. Далее измеряемый образец 4 и эталон 5 одновременно выдвигаем из электропечи 3 и с этого момента фиксируем снижение температуры. Записываем показания цифрового термометра 7 на компьютере 8 через фиксированное время (от 0,1 до 20 с). Охлаждаем образец и эталон ниже 30 °С.

Теплоемкость сплава АЖ4.5, легированного свинцом, измеряли в режиме «охлаждения» по методикам, описанным в работах [7 – 20]. Для измерения температуры использовали многоканальный цифровой термометр, который позволял прямо фиксировать результаты измерений на компьютере в виде таблиц. Точность измерения температуры составляла 0,1 °С при временном интервале ее фиксации 10 с. Относительная ошибка измерения температуры в интервале от 40 до 400 °С составляла ±1 %, а в интервале более 400 °С ±2,5 %. Погрешность измерения теплоемкости по предлагаемой методике не превышает 4 – 6 % в зависимости от температуры.

Обработка результатов измерений проводилась с помощью программы MS Excel. Графики строились с помощью программы Sigma Plot. Коэффициент корреляции  $R_{корр} = 0,999$ , что подтверждает правильность выбора аппроксимирующей функции.

Полученные зависимости скорости охлаждения сплавов описываются уравнением вида

$$T = -a \exp(-bt) - p \exp(kt), \quad (3)$$

где  $a, b, p, k$  – постоянные для данного образца;  $\tau$  – время охлаждения.

Дифференцируя уравнение (3) по  $\tau$ , получаем формулу для определения скорости охлаждения сплавов:

$$\frac{dT}{d\tau} = -abe^{-bt} - pke^{-k\tau}. \quad (4)$$

По этой формуле были вычислены скорости охлаждения эталона и образцов из сплава АЖ4.5, легированного свинцом.

По результатам проведенных экспериментов построены графики (рис. 2) зависимости температуры образцов от времени охлаждения. Видно, что кривые охлаждения для всех образцов достаточно близки друг к другу и идентично уменьшаются. На кривых охлаждения термические остановки, связанные с фазовым переходом или превращением, не обнаружены.

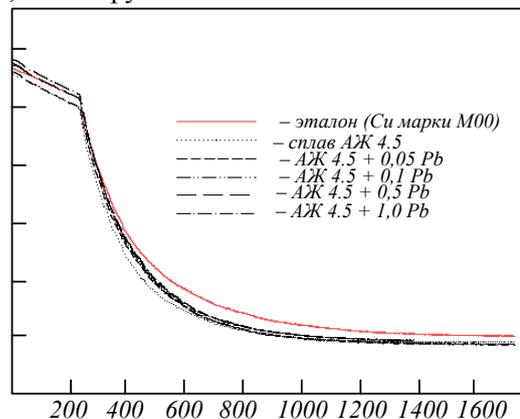


Рис. 2. График зависимости температуры  $T$  образцов от времени  $\tau$  охлаждения для эталона и сплава АЖ4.5, легированного свинцом

Значения коэффициентов  $a, b, p, k, ab, pk$  для сплава АЖ4.5, легированного свинцом

Содержание свинца в сплаве АЖ4.5, % (по массе)	$a$ , К	$b \cdot 10^{-3}$ , $с^{-1}$	$p$ , К	$k \cdot 10^{-12}$ , $с^{-1}$	$ab$ , $К \cdot с^{-1}$	$pk \cdot 10^{-10}$ , $К \cdot с^{-1}$
Эталон (медь марки М00)	703,64	3,15	292,68	2,58	2,21	7,54
Сплав АЖ4.5	728,04	3,61	281,27	2,82	2,62	7,93
То же + 0,05Pb	734,57	3,38	276,67	3,31	2,48	9,15
То же + 0,1 Pb	761,89	3,37	275,02	3,52	2,57	9,69
То же + 0,5 Pb	747,41	3,20	271,34	8,70	2,39	0,23
То же + 1,0 Pb	759,87	3,25	271,84	8,51	2,47	0,23

Обработкой кривых охлаждения установлены приведенные в табл. 1 экспериментальные значения коэффициентов  $a, b, p, k, ab, pk$  уравнений (3), (4).

Кривые скорости охлаждения исследуемых сплавов представлены на рис. 3. Расчет скорости охлаждения образцов осуществляли по уравнению (4).

Для определения удельной теплоемкости сплава АЖ4.5, легированного свинцом, использовали формулу (2). Как было указано выше, теплоемкость всех тел зависит от температуры. Температурная зависимость удельной теплоемкости эталона (Cu марки М00) и сплава АЖ4.5 со свинцом описывается четырехчленным уравнением типа

$$C_p^0 = a + bT + cT^2 + dT^3, \quad (5)$$

где  $a, b, c, d$  – эмпирические коэффициенты, найденные для каждого образца опытным путем;  $T$  – температура, при которой определяют значение теплоемкости образцов.

Значения коэффициентов в уравнении (5) представлены в табл. 2.

Результаты расчетов по уравнению (5) температурной зависимости удельной теплоемкости эталона (Cu) и сплава АЖ4.5, легированного свинцом, приведены на рис. 4 и в табл. 3. Как видно из рис. 4, в исследованном температурном интервале с ростом температуры теплоемкость сплава АЖ4.5 со свинцом растет, а у меди изменяется незначительно.

Сравнение теплоемкости исходного сплава со сплавами, легированными свинцом, показывает следующее. Рост теплоемкости исходного сплава АЖ4.5 от температуры 300 до 700 К составляет 67 %, для сплава АЖ4.5 с 0,05 % Pb – 38%, для сплава АЖ4.5 с 0,1 % Pb – 64 %, для сплава с 1 % Pb – 63 %. В зависимости от содержания свинца рост теплоемкости при 500 К составляет 1,7 %, при 600 К – 2,7 %, при 700 К – теплоемкость не растет. Согласно данным справочника [4] рост теплоемкости в указанном температурном интервале составляет для алюминия 25 %, железа 50 %, меди 12 %. Таким образом, значительный рост теплоемкости у сплава АЖ4.5 со свинцом во многом определяется влиянием содержания железа в нем.

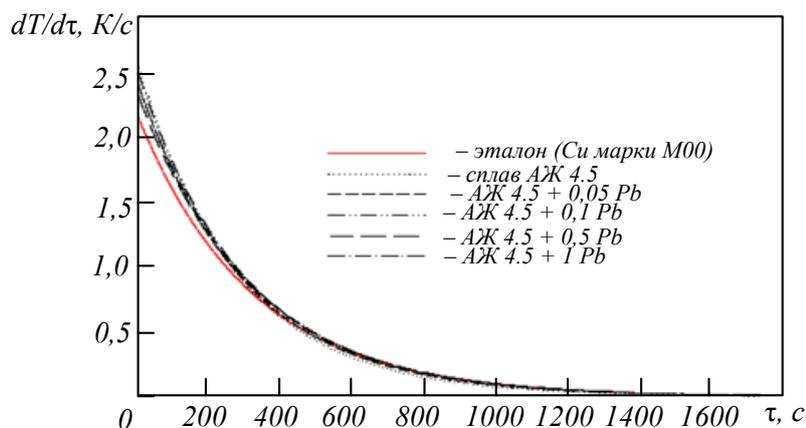


Рис. 3. Зависимость скорости охлаждения от времени для эталона (Cu) и образцов из сплава АЖ4.5, легированного свинцом

**Значения коэффициентов  $a, b, c, d$  в уравнении (5) для эталона и сплава АЖ4.5, легированного свинцом**

Содержание свинца в сплаве АЖ4.5, % (по массе)	$a$ , Дж/(кг·К)	$b$ , Дж/(кг·К <sup>2</sup> )	$c$ , Дж/(кг·К <sup>3</sup> )	$d \cdot 10^{-5}$ , Дж/(кг·К <sup>4</sup> )	Коэффициент корреляции $R$
Эталон (Cu марки М00)	324,454	0,28	$2,87 \cdot 10^{-4}$	142	1,00
Сплав АЖ4.5	-4401,48	31,54	-0,0594	3,68	0,9544
То же + 0,05Pb	-2063,04	18,16	-0,034	2,11	0,9609
То же + 0,1 Pb	-3843,64	28,09	-0,052	3,2	0,9630
То же + 0,5 Pb	-2773,51	21,09	-0,038	2,32	0,9834
То же + 1,0 Pb	-2678,26	20,40	-0,036	2,21	0,9826

Используя вычисленные данные по теплоемкости сплава АЖ4.5, легированного свинцом, и экспериментально полученные значения скорости охлаждения образцов, рассчитали коэффициент теплоотдачи  $\alpha(T)$ , Вт/(К·м<sup>2</sup>), для эталона (Cu) и сплава АЖ4.5, легированного свинцом, по следующей формуле:

$$\alpha = \frac{C_p^0 m \frac{dT}{dt}}{(T-T_0)S}. \quad (6)$$

Для сплава АЖ4.5, легированного свинцом, температурная зависимость коэффициента теплоотдачи представлена на рис. 5.

Для расчета температурной зависимости энтальпии, энтропии и энергии Гиббса для сплава АЖ4.5, легированного свинцом, были использованы интегралы от удельной теплоемкости по уравнению (5):

$$H^0(T) - H^0(T_0) = a(T - T_0) - \frac{b}{2}(T^2 - T_0^2) + \frac{c}{3}(T^3 - T_0^3) + \frac{d}{4}(T^4 - T_0^4); \quad (7)$$

$$S^0(T) - S^0(T_0) = a \ln \frac{T}{T_0} + b(T - T_0) + \frac{c}{2}(T^2 - T_0^2) + \frac{d}{3}(T^3 - T_0^3); \quad (8)$$

$$[G^0(T) - G^0(T_0)] = [H^0(T) - H^0(T_0)] - T[S^0(T) - S^0(T_0)]. \quad (9)$$

Результаты расчетов температурной зависимости энтальпии, кДж/кг, энтропии, кДж/(кг·К), и энергии Гиббса, кДж/(кг·К), для эталона (Cu марки М00) и сплава АЖ4.5 со свинцом по уравнениям (7) – (9) через 100 К представлены в табл. 4.

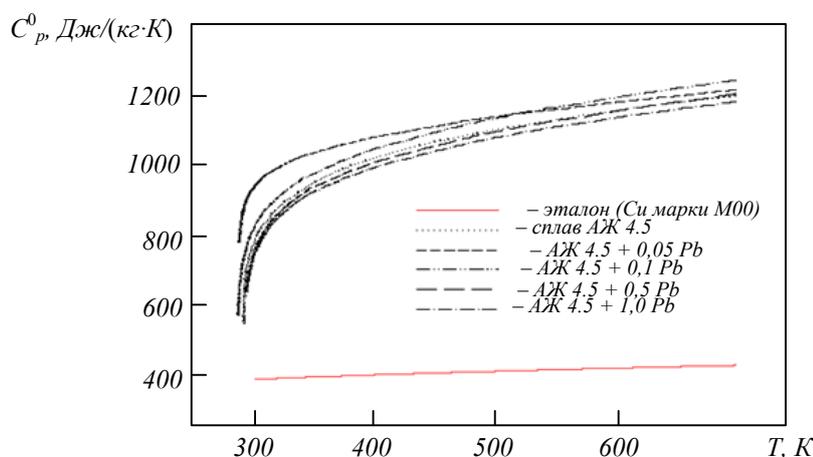


Рис. 4. Температурная зависимость удельной теплоемкости эталона (Cu марки М00) и сплава АЖ4.5 со свинцом

Температурная зависимость удельной теплоемкости эталона (Cu марки М00) и сплава АЖ4.5 со свинцом

Содержание свинца в сплаве АЖ4.5, % (по массе)	Значения удельной теплоемкости, кДж/(кг·К), при температуре, К				
	300	400	500	600	700
Эталон (Cu марки М00)	0,38	0,39	0,41	0,42	0,43
Сплав АЖ4.5	0,71	1,07	1,12	1,09	1,19
То же + 0.05 Pb	0,89	1,11	1,16	1,15	1,23
То же + 0.1 Pb	0,74	1,09	1,15	1,13	1,22
То же + 0.5 Pb	0,74	1,03	1,12	1,14	1,22
То же + 1.0 Pb	0,73	1,02	1,10	1,12	1,19

**Выводы.** Получены полиномы температурной зависимости теплоемкости и термодинамических функций (энтальпии, энтропии и энергии Гиббса) для эталона (Cu марки М00) и сплава АЖ4.5, легированного свинцом, которые с коэффициентом корреляции  $R_{кор} = 0,999$  описывают их изменения. Показано, что с ростом температуры удельная теплоемкость, энтальпия и энтропия сплава АЖ4.5, легированного свинцом, увеличиваются, а значения энергии Гиббса уменьшаются. Добавки свинца практически не влияют на теплоемкость исходного сплава АЖ4.5, уменьшают энтальпию и энтропию, незначительно увеличивают значения энергии Гиббса.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Луц А.Р., Суслина А.А. Алюминий и его сплавы. – Самара: Самарский государственный технический университет, 2013. – 81 с.
2. Мондольфо Л.Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов. – М.: Металлургия, 1979. – 640 с.
3. Чукин М.В., Салганик В.М., Полецков П.П., Кузнецова А.С., Бережная Г.А., Гущина М.С. Основные виды и области применения наноструктурированного высокопрочного листового проката // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. № 4. С. 41 – 44.
4. Зиновьев В.Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах. Справочник. – М.: Металлургия, 1989. – 384 с.
5. Старк Б.В. Явления нагрева в муфельных печах // Журнал Русского Metallургического Общества. 1926. № 2. С. 184 – 198.
6. Иванцов Г.П. Нагрев металла (теория и методы расчета). Свердловск – Москва: Государ. научно-техн. изд-во литературы по черной и цветной металлургии, 1948. – 191 с.
7. Ganiev I.N., Mulloeva N.M., Nizomov Z., Obidov F.U. Temperature dependence of the specific heat and thermodynamic functions of alloys of the Pb-Ca system // High temperature. 2014. Vol. 52. Iss. 1. P. 138 – 140.
8. Зокиров Ф.Ш., Ганиев И.Н., Бердиев А.Э., Иброхимов Н.Ф. Температурная зависимость теплоемкости и термодинамических функций сплава АК12М2, модифицированного стронцием // Известия СПбГТИ(ТУ). 2017. № 1. С. 22 – 26.

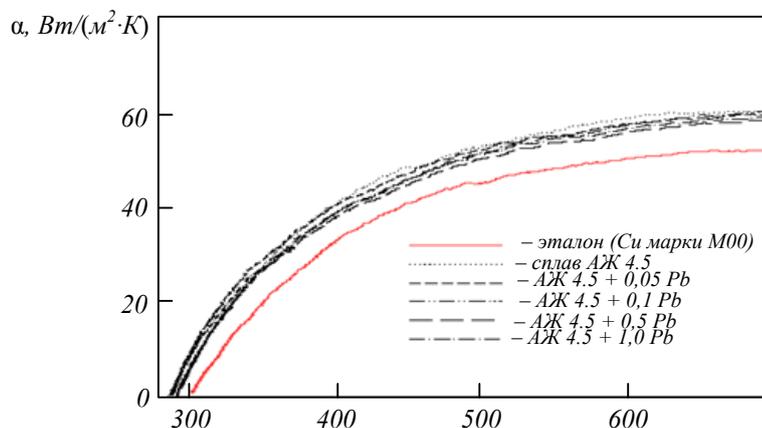


Рис. 5. Температурная зависимость коэффициента теплоотдачи эталона (Cu) и сплава АЖ4.5, легированного свинцом

## Температурная зависимость термодинамических функций сплава АЖ4.5 со свинцом и эталона (Cu марки М00)

Содержание свинца в сплаве АЖ4.5, % (по массе)	$[H^0(T) - H^0(T_0)]$ , кДж/кг, при $T$ , К				
	300	400	500	600	700
Эталон (Cu марки М00)	0,7120	39,8675	80,1667	121,4190	163,5190
Сплав АЖ4.5	1,2997	93,4342	204,2437	314,2882	426,2077
То же+ 0,05 Pb	1,5392	99,6997	211,3472	323,8217	438,9832
То же + 0,1 Pb	1,3776	96,3986	209,9296	323,9706	439,7216
То же+ 0,5 Pb	1,3668	92,6540	201,7961	315,0333	432,5255
То же+ 1,0 Pb	1,3531	91,5813	199,3944	311,0626	426,1158
	$[S^0(T) - S^0(T_0)]$ , кДж/(кг·К),				
Эталон(Cu марки М00)	0,0024	0,1149	0,2048	0,2800	0,3449
Сплав АЖ4.5	0,0043	0,2669	0,5140	0,7147	0,8870
То же+ 0,05 Pb	0,0055	0,2987	0,5539	0,7642	0,9459
То же+ 0,1 Pb	0,0046	0,2756	0,5287	0,7367	0,9150
То же+ 0,5 Pb	0,0046	0,2652	0,5084	0,7148	0,8957
То же + 1,0 Pb	0,0045	0,2621	0,5023	0,7059	0,8831
	$[G^0(T) - G^0(T_0)]$ , кДж/(кг·К)				
Эталон(Cu марки М00)	-0,0022	-6,1071	-22,2427	-46,5847	-77,9021
Сплав АЖ4.5	-0,0040	-13,3399	-52,7514	-114,5451	-194,7257
То же + 0,05 Pb	-0,1177	-19,7979	-65,6083	-134,7558	-223,2159
То же + 0,1 Pb	-0,00425	-13,8519	-54,4252	-118,0481	-200,7537
То же + 0,5 Pb	-0,00422	-13,4106	-52,3796	-113,8241	-194,4686
То же + 1,0 Pb	-0,00418	-13,2601	-51,7724	-112,4749	-192,0590

Примечание. \*  $T_0 = 298,15$  К

- Ганиев И.Н., Ниёзов Х.Х., Гулов Б.Н., Низомов З., Бердиев А.Э. Температурная зависимость теплоемкости и термодинамических функций сплава АКМ2, легированного празеодимом и неодимом // Вестник СибГИУ. 2017. № 3. С. 32 – 39.
- Ibrokhimov N.F., Ganieva N.I., Ibrokhimov S.Z., Ganiev I.N., Nizomov Z. Effect of cerium on the thermophysical properties of AMG2 alloy // The Physics of Metals and Metallography. 2016. Vol. 117. № 1. P. 49 – 53.
- Раджабаев С.С., Ганиев И.Н., Иброхимов Н.Ф. Теплофизические свойства алюминия марки А7 и сплава Al+2.18%Fe // Новая наука: От идеи к результату. 2016. № 2-3 (66). С. 44 – 46.
- Иброхимов Н.Ф., Ганиев И.Н., Ганиева Н.И. Влияние иттрия на теплофизические свойства сплава АМГ2 // Научный вестник НовГУ. 2017. № 2. С. 177 – 187.
- Иброхимов Н.Ф., Ганиев И.Н., Низомов З., Ганиева Н.И., Иброхимов С.Ж. Влияние церия на теплофизические свойства сплава АМг2 // Физика металлов и металловедение. 2016. Т. 117. № 1. С. 53 – 58.
- Иброхимов С.Ж., Эшов Б.Б., Ганиев И.Н., Кобулиев З.В., Иброхимов Н.Ф. Теплофизические свойства и термодинамические функции сплава АМг4, легированного лантаном // Доклады АН Республики Таджикистан. 2015. Т. 58. № 11. С. 1029 – 1035.
- Алиханова С.Д., Ганиев И.Н., Обидов З.Р., Саидов Р.Х. Теплофизические свойства и термодинамические функции сплава Zn55Al, легированного церием // Вестник ТГУ. 2014. № 4 (28). С. 82 – 87.
- Obidov Z.R., Amini R.N., Ganiev I.N., Nizomov Z. Temperature Dependence of Thermodynamic Properties of Zn-5Al and Zn-55Al Alloys With Magnesium // Oriental Journal of Chemistry. 2012. Vol. 28. No. (2). P. 841 – 846.
- Низомов З., Гулов Б., Ганиев И.Н., Саидов Р.Х., Обидов Ф.У. Эшов Б.Б. Исследование температурной зависимости удельной теплоемкости алюминия марок ОСЧ и А7 // Доклады АН Республики Таджикистан. 2011. Т. 54. № 1. С. 53 – 59.
- Обидов З.Р. Теплофизические свойства и термодинамические функции сплава Zn-55Al, легированного бериллием, магнием и празеодимом // Теплофизика высоких температур. 2017. Т. 55. № 1. С. 146 – 149.
- Осими О., Назаров Х.М., Ганиев И.Н. Температурная зависимость теплоемкости и коэффициента теплоотдачи сплава АК12, легированного сурьмой // Материалы Международной конф. «Общество с ограниченной ответственностью «Наука и новые технологии». – Бишкек, 2017. № 1. С. 18 – 20.
- Амонова А.В., Обидов З.Р., Ганиев И.Н. Теплоемкость и термодинамические функции цинк-алюминиевых сплавов, легированных скандием. – В сб.: Инновационные технологии в науке и образовании. II Международная научно-практической конференция / Под общ. ред. Г.Ю. Гуляева. – Пенза: Наука и просвещение, 2017. С. 13 – 16.

© 2018 г. И.Н. Ганиев, А.Г. Сафаров,  
Ф.Р. Одинаев, К. Кабутов, К. Ботуров  
Поступила 24 апреля 2018 г.