

## МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

УДК 669.2: 669.715

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-4-34-43>ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА  
И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ  
АЛЮМИНИЕВО-МАГНИЕВОГО СПЛАВА АМg2 С ИНДИЕМГаниев И.Н.<sup>1</sup>, Шарипова Х.Я.<sup>2</sup>, Одиназода Х.О.<sup>1</sup>, Иброхимов Н.Ф.<sup>1</sup>, Ганиева Н.И.<sup>1</sup><sup>1</sup>Таджикский технический университет им. М.С. Осими, Душанбе, Таджикистан<sup>2</sup>Хатлонский государственный медицинский университет, Душанбе, Таджикистан

**Аннотация.** Постановка задачи (актуальность работы): Применение алюминия и его сплавов как конструкционных материалов обусловлено их стойкостью к коррозии. Алюминиево-магниевого сплавы обладают высокой стойкостью к коррозии в атмосферных и морских условиях, в щелочных растворах и растворах кислот малой плотностью, хорошей обрабатываемостью резанием. По коррозионной стойкости эти сплавы значительно превосходят литейные сплавы других систем на основе алюминия. Высокая коррозионная стойкость алюминий-магниевого сплава в различных средах определяется образованием гидратной пленки, задерживающей коррозионный процесс. Высокая прочность сплавов этой системы связана с увеличением искажения кристаллической решетки с повышением содержания магния в твердом растворе. Для повышения коррозионных и механических свойств в алюминий-магниевого сплавы вводят добавки различных металлов. Одной из важнейших характеристик алюминий-магниевого сплава является теплоемкость. Знание теплоемкости и ее температурной зависимости играет большую роль в исследованиях сплавов. **Цель работы:** изучение температурной зависимости теплофизических свойств и термодинамические функции алюминий-магниевого сплава АМg2 с индием. **Используемые методы:** описано много методов измерения теплоемкости твердого тела. В настоящей работе применяется метод сравнения кривых охлаждения эталонного и исследуемого образцов в режиме «охлаждения» с использованием медного эталона (Cu марки М00) в интервале 300–800 К. **Новизна:** впервые исследовано влияние добавок индия на теплофизические свойства и изменения термодинамических функций алюминий-магниевого сплава АМg2. **Результат:** установлены математические модели, которые описывают температурную зависимость теплоемкости сплава АМg2 от содержания индия и изменение их термодинамических функций в указанном температурном диапазоне. В результате проведенных исследований показано, что с ростом температуры теплоемкость, энтальпия и энтропия сплавов увеличиваются, а значение энергии Гиббса уменьшается. Добавки индия в сплаве АМg2 незначительно уменьшают величины указанных функций. **Практическая значимость:** полученные характеристики теплофизических свойств и термодинамических функций алюминий-магниевого сплава АМg2 с индием пополняют страницы соответствующих справочников по теплофизике материалов и могут использоваться при проектировании деталей и машин из указанных сплавов.

**Ключевые слова:** алюминий-магний сплав АМg2, индий, теплоемкость, режим «охлаждения», энтальпия, энтропия, энергия Гиббса.

## Введение

К сплавам системы Al-Mg относятся сплавы типа АМg1, АМg2, АМg3, АМg4 и АМg6, которые широко используются в промышленности. В сплавах системы Al-Mg, с ростом содержания магния твердость и усталостная прочность повышается, а пластичность понижается. Эти сплавы широко используются в промышленности и отличаются высокой пластичностью, хорошей свариваемостью и высокой коррозионной стойкостью [1–3].

Из литературы известно, что сплавы системы

Al-Mg с содержанием магния до 6% являются стойкими к коррозионному разрушению в различных средах. При более высоких содержаниях магния коррозионная стойкость сплавов снижается [3–5].

По глубине питтинга в морской воде промышленные сплавы системы Al-Mg располагаются в ряд: АМg1→АМg2→АМg3→АМg4→АМg6, т.е. последний сплав обладает максимальной глубиной питтинга.

В морской воде имеет место корреляция между чувствительностью к структурной коррозии и обычным питтингом. С ростом степени легирования сплавов возрастает пресыщение твердого раствора и вместе с ним чувствительность к структурной коррозии [5–7].

© Ганиев И.Н., Шарипова Х.Я., Одиназода Х.О., Иброхимов Н.Ф., Ганиева Н.И., 2019

Практика показывает, что при концентрации до 3.5%Mg сплавы системы Al-Mg не проявляют чувствительность к межкристаллитной коррозии. Это объясняется дискретным распределением твердого раствора  $\beta$  – фазы по границам зерен в связи с малым распределением твердого раствора. Отсюда целесообразно предотвращение образования пленки  $\beta$  – фазы по границам зерен для повышения сопротивления коррозионному растрескиванию [2]. Чтобы устранить указанные недостатки, сплавы системы Al-Mg подвергают легированию различными компонентами [4–7].

В литературе нет сведений о теплофизических свойствах сплава AlMg2 с индием. Как известно, теплофизические свойства материалов являются важнейшими характеристиками, определяющими закономерности их поведения при различных внешних воздействиях.

Цель работы заключается в исследовании влияния добавок индия на теплофизические свойства и термодинамические функции алюминиево-магниевого сплава AlMg2.

### Теория метода и описание установки

В литературе описано много методов измерения теплоемкости твердого тела. В настоящей работе используется метод сравнения кривых охлаждения эталонного и исследуемого образцов. Исследуемый образец, нагретый до температуры, превышающей температуру окружающей среды, будет охлаждаться.

Скорость охлаждения образца зависит от её теплоемкости. Сравнивая термограммы (зависимости температуры от времени) двух образцов, один из которых является эталоном с известной теплоемкостью, можно определить теплоемкость другого, то есть исследуемого образца [8–11].

Физическая сущность предлагаемого метода измерения состоит в следующем. Скорость охлаждения образцов определяется тремя механизмами теплопередачи – теплопроводностью окружающей среды, конвекцией и излучением. Для первых двух процессов с достаточной точностью можно констатировать, что тепловой поток от нагретого тела ( $J$ ) пропорционален разности между температурой поверхности образца  $T$  и температурой окружающей среды  $T_0$  (закон Ньютона-Рихмана):

$$J = \alpha(T - T_0). \quad (1)$$

Коэффициент теплопередачи  $\alpha$  зависит от большого количества параметров, его невозможно описать общей формулой, поэтому коэффициент теплоотдачи на практике определяется экспериментально.

Тепловой поток за счет излучения имеет несколько иную зависимость от температуры (закон Стефана–Больцмана)

$$J = \sigma \varepsilon S(T^4 - T_0^4), \quad (2)$$

где  $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8}$  Вт/м<sup>2</sup>К<sup>4</sup>,  $\varepsilon$  – коэффициент поглощения;  $S$  – площадь поверхности тела.

При небольшой разности температур  $T - T_0$  он приближенно сводится к виду (1):

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

Температура при охлаждении тела будет спадать по экспоненте, если не учитывать излучение и считать, что теплоемкость и коэффициент теплопередачи постоянны, а окружающая среда бесконечна и однородна. Уравнение теплового баланса

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

здесь имеет вид

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

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

Решением данного уравнения является

$$T(t) = (T_1 - T_0)e^{-t/\tau} + T_0, \quad (6)$$

где  $T_1$  – начальная температура;  $\tau = mc / \alpha$  – время тепловой релаксации.

В случае выполнения всех указанных выше условий теплоемкость материала образца можно определить из измеренного по термограмме параметру релаксации  $\tau$ . Однако, ввиду того, что величина  $\alpha$  не известна, измерения нужно вести параллельно с эталонным образцом с известной теплоемкостью. При этом образец должен иметь те же размеры, чтобы условия охлаждения у них были идентичны. Допуская, что коэффициент  $\alpha$  у них одинаков, теплоемкость измеряемого материала  $c_x$  можно найти по формуле

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

где  $C_0^0$  – теплоемкость эталонного материала;  $m_x$  и  $m_0$  – массы исследуемого и эталонного;  $\tau_x$  и  $\tau_0$  – измеренное время тепловой релаксации

для исследуемого образца и эталона,  $\tau_x = \left(\frac{dT}{dt}\right)_x$  и  $\tau_0 = \left(\frac{dT}{dt}\right)_0$ .

Этот метод предполагает: 1) постоянство  $c_x$  и  $c_0$ , коэффициента  $\alpha$  при изменении темпера-

туры; 2) охлаждение в бесконечной среде и 3) температуры образцов, при которых излучением можно пренебречь по сравнению с теплопроводностью и конвекцией. Несоблюдение любого из указанных условий нарушает экспоненциальный ход кривой охлаждения [7, 8].

Учет зависимости  $c_x$  и  $c_y$  от температуры можно выполнить, разбив термограмму на узкие интервалы температур, в которых теплоемкости и коэффициент  $\alpha$  можно считать постоянными. Найдя для каждого интервала свои параметры тепловой релаксации  $\tau_x(T)$  и  $\tau_y(T)$ , можно использовать их для расчета  $c_x(T)$ .

В данной работе определение средней теплоемкости проводится по всему измеряемому интервалу температур. При этом коэффициент теплопередачи  $\alpha$  для всех образцов предполагается одинаковым [9, 10].

Скорости охлаждения  $\tau_y$  и  $\tau_x$  определяются путём построения кривых охлаждения эталона и исследуемых образцов, которые представляют собой зависимость температуры образца от времени при охлаждении его в неподвижном воздухе.

Передача тепла от более нагретого тела к менее нагретому – процесс, стремящийся к установлению термодинамического равновесия в системе. При этом система состоит из огромного числа частиц, то есть это релаксационный процесс, который можно описать во времени экспонентой. В нашем случае нагретое тело передает свое тепло окружающей среде (т.е. телу с бесконечно большой теплоемкостью). Отсюда температуру окружающей среды можно считать постоянной ( $T_0$ ). В таком случае закон изменения температуры тела от времени  $\tau$  можно записать в виде

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

Здесь  $\Delta T$  – разность температур окружающей

среды и нагретого тела;  $\Delta T_1$  – разность температур окружающей среды и нагретого тела при  $\tau = 0$ ;  $\tau_1$  – постоянная охлаждения, численно равная времени, в течение которого разность температур между окружающей средой и нагретым телом уменьшается в  $e$  раз.

Измерение теплоемкости проводилось по методикам, описанным в работах [12–21]. Схема установки (малый патент Респ. Таджикистан № ТД 877 «Установка для определений теплоемкости и теплопроводности твердых тел», приоритет изобретения от 20.04.2017 г.) для измерения теплоемкости 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 (тоже могут перемещаться) представляют собой цилиндр длиной 30 мм и диаметром 16 мм с высверленными каналами с одного конца, в которые вставлены термодатчики 4 и 5. Концы термодатчиков подведены к цифровому многоканальному термометру 7, который подсоединен к компьютеру 8.

Включаем электропечь 3 через автотрансформатор 1, установив нужную температуру с помощью терморегулятора 2. По показаниям цифрового многоканального термометра 7 отмечаем значение начальной температуры.

Выдвигаем измеряемый образец 4 и эталон 5 в электропечь 3 и нагреваем до нужной температуры. При этом контролируем температуру по показаниям цифрового многоканального термометра на компьютере 8. Затем измеряемый образец 4 и эталон 5 одновременно выдвигаем из электропечи 3, и с этого момента фиксируем снижение температуры. Далее записываем показания цифрового термометра 7 на компьютере 8 через фиксированное время (от 0,1 до 20 с). Образец и эталон охлаждаем ниже 30°C.

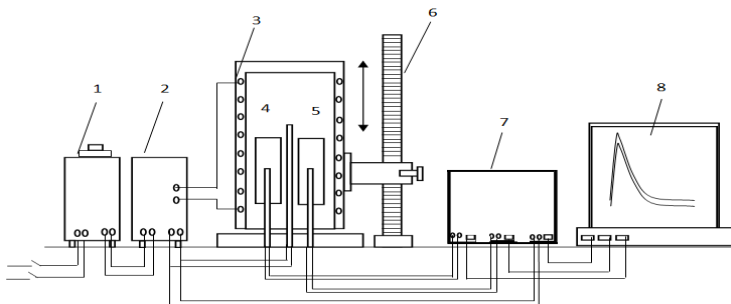


Рис. 1. Схема установки для определения теплоемкости твердых тел в режиме «охлаждения»: 1 – автотрансформатор; 2 – терморегулятор; 3 – электропечь; 4 – образец измеряемый; 5 – эталон; 6 – стойка электропечи; 7 – многоканальный цифровой термометр; 8 – регистрирующий прибор (компьютер)

### Результаты и их обсуждение

Теплоёмкость алюминиевого сплава АМг2 с индием измеряли в режиме «охлаждения». С помощью программ MS Excel и Sigma Plot производилась обработка результатов измерений и построение графиков. Значение коэффициента корреляции  $R_{\text{корр}} \leq 1,00$ , подтверждающая правильность выбора аппроксимирующей функции. Временной интервал фиксации температуры – 10 с. Относительная погрешность измерения температуры составляла  $\pm 1\%$ , в интервале от 40 до  $400^\circ\text{C}$  и при более  $400^\circ\text{C}$  составлял  $\pm 2,5\%$ . Погрешность измерения теплоемкости не превышала 4%. На **рис. 2** представлены полученные в ходе эксперимента зависимости температуры образца от времени охлаждения для сплава АМг2 с индием, которые описываются уравнением вида

$$T = T_0 + \frac{1}{2} \left[ \frac{(T_1 - T_0) e^{-\tau/\tau_1} + (T_2 - T_0) e^{-\tau/\tau_2}}{1} \right]. \quad (8)$$

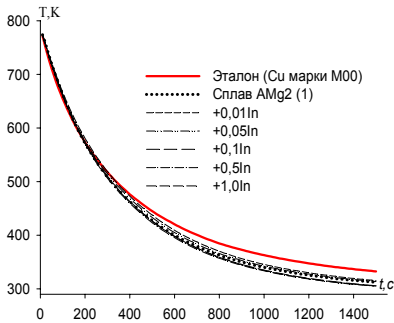


Рис. 2. Зависимость изменения температуры (Т) от времени охлаждения образцов из сплава АМг2 с индием и эталона (Cu марки М00)

Дифференцируя уравнения (8) по  $\tau$ , получаем уравнение для определения скорости охлаждения образцов из сплава АМг2 с индием и медно-го эталона марки (М00):

$$\frac{dT}{d\tau} = \frac{1}{2} \left[ \frac{-(T_1 - T_0) e^{-\tau/\tau_1}}{\tau_1} - \frac{-(T_2 - T_0) e^{-\tau/\tau_2}}{\tau_2} \right]. \quad (9)$$

На **рис. 3** приведены рассчитанные по данному дифференцированному уравнению зависимость скорости охлаждения  $dT/d\tau - T$  для образцов из сплавов. Экспериментальные значения  $\Delta T_{0i}$ ,  $\tau_1$ ,  $\Delta T_{02}$ ,  $\tau_2$  из уравнения (9) для исследованных сплавов представлены в **табл. 1**. Результаты эксперимента обработаны с помощью программ MS Excel, графики построены по программе Sigma Plot. При этом коэффициент корреляции составлял не менее 1,00.

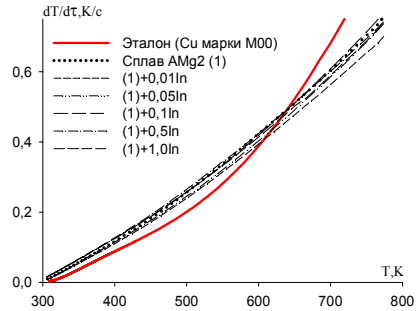


Рис. 3. Зависимость скорости охлаждения образцов из сплава АМг2 с индием и эталона (Cu марки М00) от температуры

Обработывая полученные экспериментальные и имеющиеся литературные данные по теплоемкости сплава АМг2 и индия [22] по программе Sigma Plot и используя уравнение (7), получили следующие уравнения температурной зависимости удельной теплоемкости (в скобках представлены соответствующие им коэффициенты регрессии):

$$C_P^{0 \text{ AMg2}} = 0.4148 + 0.00095857T + 9.5925 \cdot 10^{-7} T^2 - 1.304 \cdot 10^{-9} T^3. \quad (R=1,0000);$$

$$C_P^{\text{In}} = 138.6337 + 0.6523T - 1.22 \cdot 10^{-3} T^2 + 6.97 \cdot 10^{-7} T^3. \quad (R=1,0000).$$

Рассчитанные значения  $C_P^0$  для сплава АМг2 с индием через 100 К приведены в **табл. 2** и на **рис. 4**. Видно, что от температуры теплоемкость сплавов увеличивается, а от содержания индия незначительно уменьшается.

Далее вычислили температурную зависимость коэффициента теплоотдачи ( $\alpha$ , Вт/К·м<sup>2</sup>) по полученным экспериментально величинам ско-

рости охлаждения образцов из сплавов и по рассчитанным результатам теплоемкости для сплава АМг2 с индием. Результаты расчёта, представленные в **табл. 3** показывают, что с ростом температуры и содержания индия в сплаве АМг2 коэффициента теплоотдачи увеличивается.

С применением программы Sigma Plot получены коэффициенты для уравнения, описывающего температурную зависимость удельной теплоемкости сплава АМг2 с индием. Значения коэффициентов представлены в **табл. 4**.

$$C_p^0 = a + bT + cT^2 + dT^3. \quad (10)$$

При вычислении температурной зависимости изменений энтальпии, энтропии и энергии Гиббса были применены интегралы от удельной теплоемкости по (10):

$$[H^0(T) - H^0(T_0)] = a(T - T_0) + \frac{b}{2}(T^2 - T_0^2) + \frac{c}{3}(T^3 - T_0^3) + \frac{d}{4}(T^4 - T_0^4); \quad (11)$$

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

$$[G^0(T) - G^0(T_0)] = [H^0(T) - H^0(T_0)] - T[S^0(T) - S^0(T_0)], \quad (13)$$

где  $T_0 = 273,15$  К.

Результаты расчёта температурной зависимости изменений энтальпии, энтропии и энергии Гиббса для сплава АМг2 с индием и эталона (Cu марки М00) через 100 К представлены в **табл. 5**.

Таблица 1

**Значения коэффициентов  $\Delta T_1, \tau_1, \Delta T_2, \tau_2$  в уравнении (9) для сплава АМг2 с индием и эталона (Cu марки М00)**

Содержание индия в сплаве, мас.%	$\Delta T_1, \text{K}$	$\tau_{1,c}$	$\Delta T_2, \text{K}$	$\tau_{2,c}$	$\Delta T_{01}/\tau_{1, \text{K/c}}$	$\Delta T_{02}/\tau_{2, \text{K/c}}$	$\Delta T_0, \text{K}$
Сплав АМг2	138,33	169,49	356,17	467,38	0,8162	0,7621	297,67
(1)+0,01%In	131,725	180,83	359,57	494,34	0,7285	0,7274	297,77
(1)+0,05% In	94,25	143,21	396,00	450,71	0,6581	0,8786	299,27
(1)+0,1% In	92,80	134,00	405,86	442,58	0,6925	0,9170	292,31
(1)+0,5% In	120,839	169,70	377,29	454,94	0,7121	0,8293	291,08
(1)+1,0% In	86,027	143,32	411,04	440,70	0,6002	0,9327	291,73
Эталон (Cu марки М00)	277,41	109,73	390,83	543,51	2,5282	0,7191	308,35

Таблица 2

**Температурная зависимость удельной теплоёмкости (кДж/кг·К) сплава АМг2 с индием и эталона (Cu марки М00)**

Содержание индия в сплаве, мас.%	T, K					
	300	400	500	600	700	800
Сплав АМг2(1)	0,7537	0,8686	0,9716	1,0546	1,1101	1,1302
(1)+0,01%In	0,7534	0,8682	0,9708	1,0535	1,1084	1,1278
(1)+0,05% In	0,7532	0,8679	0,9705	1,0532	1,1081	1,1274
(1)+0,1% In	0,7530	0,8676	0,9702	1,0528	1,1077	1,1270
(1)+0,5% In	0,7509	0,8651	0,9673	1,0495	1,1042	1,1234
(1)+1,0% In	0,7484	0,8621	0,9636	1,0455	1,0998	1,1190
Рост $C_p^0, \%$	-0,67	-0,71	-0,74	-0,77	-0,78	-0,79
Эталон (Cu марки М00)	0,3850	0,3977	0,4080	0,4169	0,4251	0,4336

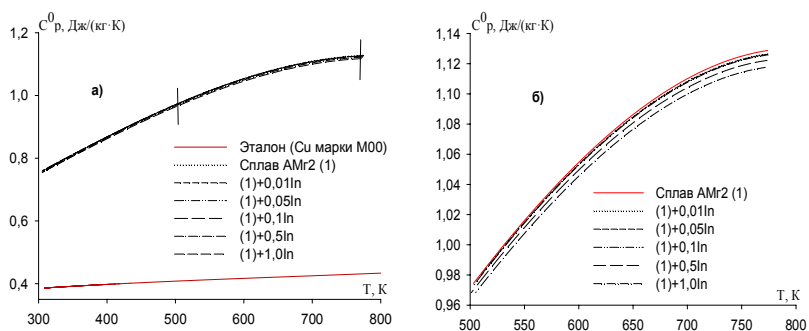


Рис. 4. Зависимость удельной теплоёмкости от температуры для сплава АМг2 с индием (а) и в интервале температур 500–800 К (б)

Таблица 3

Температурная зависимость коэффициента теплоудачи (Вт/К·м<sup>2</sup>) сплава АМг2 с индием и эталона (Си марки М00)

Содержание индия в сплаве, мас. %	Т, К					
	300	400	500	600	700	800
Сплав АМг2 (1)	0,00014	0,0017	0,0033	0,0051	0,0064	0,0075
(1)+0,01%In	0,000078	0,0018	0,0035	0,0051	0,0066	0,0079
(1)+0,05% In	0,000067	0,0017	0,0033	0,0049	0,0064	0,0079
(1)+0,1% In	0,000182	0,0019	0,0035	0,0051	0,0066	0,0081
(1)+0,5% In	0,000196	0,0020	0,0037	0,0053	0,0068	0,0080
(1)+1,0% In	0,001286	0,0038	0,0064	0,0091	0,0118	0,0146
Эталон (Си марки М00)	0,000066	0,0021	0,0039	0,0065	0,0099	0,013

Таблица 4

Значения коэффициентов а, b, с, d в уравнении (10) для сплава АМг2 с индием и эталона (Си марки М00)

Содержание индия в сплаве, мас. %	$a$ , Дж/кг·К	$b \cdot 10^{-4}$ , Дж/кг·К <sup>2</sup>	$c \cdot 10^{-7}$ , Дж/кг·К <sup>3</sup>	$d \cdot 10^{-9}$ , Дж/кг·К <sup>4</sup>	Коэффициент корреляции $R_c$ , %
Сплав АМг2 (1)	0,4148	9,59	9,59	-1,30	1,00
(1)+0,01%In	0,4148	9,59	9,59	-1,30	1,00
(1)+0,05% In	0,4148	9,59	9,57	-1,30	1,00
(1)+0,1% In	0,4149	9,60	9,55	-1,30	1,00
(1)+0,5% In	0,4154	9,64	9,39	-1,28	1,00
(1)+1,0% In	0,4159	9,70	9,18	-1,26	1,00
Эталон (Си марки М00)	0,3245	2,75	-2,87	0,142	1,00

Температурная зависимость изменений термодинамических функций сплава АМг2 с индием

Т, К	Эталон (Cu марки М00)	Сплав АМг2 (1)	(1)+0,01% In	(1)+0,05% In	(1)+0,1% In	(1)+0,5% In	(1)+1,0% In
	$[H^0(T) - H^0(T_0^*)]$ , кДж/кг для сплавов						
300	0,71	1,39	1,39	1,3914	1,3909	1,3873	1,3825
400	39,86	82,57	82,51	82,52	82,48	82,27	81,97
500	80,16	174,71	174,57	174,58	174,51	174,05	173,40
600	121,41	276,22	275,96	275,99	275,87	275,14	274,08
700	163,51	384,72	384,31	384,38	384,19	383,18	381,67
800	206,44	497,06	496,46	496,58	496,31	495,03	493,05
$[S^0(T) - S^0(T_0^*)]$ , кДж/кг · К для сплавов							
300	0,0024	0,0046	0,0047	0,0047	0,0047	0,0046	0,0046
400	0,1154	0,2374	0,2372	0,2373	0,2372	0,2365	0,2357
500	0,2058	0,4425	0,4422	0,4423	0,4421	0,4409	0,4393
600	0,2816	0,6274	0,6269	0,6269	0,6267	0,6250	0,6226
700	0,3473	0,7945	0,7938	0,7939	0,7935	0,7914	0,7884
800	0,4055	0,9445	0,9435	0,9437	0,9432	0,9408	0,9371
$[G^0(T) - G^0(T_0^*)]$ , кДж/кг для сплавов							
300	-0,0042	-0,004	-0,0043	-0,0043	-0,0043	-0,0043	-0,0043
400	-6,27802	-12,39	-12,3809	-12,38	-12,37	-12,34	-12,30
500	-22,7266	-46,58	-46,5447	-46,54	-46,52	-46,40	-46,23
600	-47,5615	-100,28	-100,154	-100,16	-100,11	-99,85	-99,48
700	-79,5877	-171,48	-171,329	-171,34	-171,27	-170,81	-170,17
800	-117,957	-258,58	-258,33	-258,36	-258,25	-257,57	-256,60

\*  $T_0 = 298,15\text{К}$ .

### Заключение

В режиме «охлаждения» по известной теплоёмкости эталонного образца из меди марки М00 установлена температурная зависимость теплоёмкости сплава АМг2 с индием. Получены полиномы, описывающие температурную зависимость теплоёмкости и изменения термодинамических функций (энтальпия, энтропия, энергия Гиббса) для сплава АМг2 с индием в интервале температур 300–800 К. С помощью установленных полиномиальных зависимостей показано, что с ростом температуры теплоёмкость, энтальпия и энтропия сплавов увеличиваются, а значения энергии Гиббса уменьшается. Добавки индия в изученном концентрационном интервале (0,01–1,0 мас.%) практически не влияют на теплоёмкость и термодинамические функции сплава АМг2.

### Список литературы

1. Иброхимов Н.Ф., Ганиев И.Н., Одинаев Х.О. Физикохимия сплава АМг2 с редкоземельными металлами. Душанбе: ИО ТТУ им. М.С. Осими, 2016. 153 с.
2. Умарова Т.М., Ганиев И.Н. Коррозия двойных алюминевых сплавов в нейтральных средах. Душанбе: До-ниш, 2007. 258 с.
3. Sanad S.H., Ismail A.A. Corrosion of Al-Mg alloys in sodium chloride solution // Corros. Prev. and Contr. 1982. 29. No 5. P. 21–23.
4. Rohlfis U., Kaiser H., Kaesche H. Metallkundliche und elektronische untersuchungen die interkristalline corrosion on einer AlMg-9,56 knetlegierung. // Werkst. And Korros., 1979. 30. No 8. P. 529–535.
5. Черепанова Г.Л., Шрейдер А.В. Исследование влияния ионов охлаждающих вод на питтинговую коррозию сплава Al-Mg // ЖПХ. 1972. Т.45. Вып. 9. С. 1958–1963.
6. Ahmed Zaki. Corrosion and corrosion prevention of Al –

- alloys in desalination planets: a review. *Solution // Anti-Corros. Meth. And Mater.* 1981. 28. No 6. P. 4–7.
7. Muller I.L., Galvele J.R. Pitting potential of high purity binary aluminum alloys // *Corros. Sci.*, 1977. 17. No 12. P. 995–1007.
  8. Киров С.А., Салецкий А.М., Харабадзе Д.Э. Изучение явлений переноса в воздухе. Описание задачи №219 общего физического практикума «Молекулярная физика» Физического факультета МГУ. М.: ООП Физ. фак-та МГУ, 2013. 22 с.
  9. Матвеев А.Н. Молекулярная физика. М.: Бинном, 2010. С. 321–333.
  10. Сивухин Д.В. Общий курс физики. М.: Физматлит, 2006. 544 с.
  11. Кикоин А.К., Кикоин И.К. Молекулярная физика. М.: Лань, 2008. 480 с.
  12. Температурная зависимость теплоемкости и изменений термодинамических функций сплава АЖ 4.5 с оловом / Ганиев И.Н., Сафаров А.Г., Одинаев Ф.Р., Якубов У.Ш., Кабутов К. // *Изв. вузов. Цветная металлургия.* 2019. №1. С. 50–28.
  13. Влияние лития на теплоемкость и изменении термодинамических функции алюминиевого сплава АЖ2.18 / Азимов Х.Х., Ганиев И.Н., Амонов И.Т., Иброхимов Н.Ф. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова.* 2018. Т.16. №1. С. 37–44.
  14. Микроструктура и механические свойства сплава Al+6%Li с редкоземельными металлами / Назаров Ш.А., Ганиев И.Н., Ганиева Н.И., Каллиари И. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова.* 2017. Т.15. №2. С. 63–68.
  15. Влияния кальция на температурную зависимость удельной теплоемкости и изменение термодинамических функции алюминиевого сплава АЖ5К10 / Ганиев И.Н., Якубов У.Ш., Сангов М.М., Сафаров А.Г. // *Вестник Казанского технологического университета.* 2018. Т.21. №8. С. 11–15.
  16. Влияние стронция на теплоемкость и изменение термодинамических функции свинцового сплава ССу3 / Ганиев И.Н., Ниёзов О.Х., Сафаров А.Г., Муллоева Н.М. // *Известия Санкт-Петербургского государственного технического института (технологического университета).* 2018. № 47(73). С. 36–42.
  17. Температурная зависимость теплоемкости и изменении термодинамических функции сплава АК1М2, легированного стронцием / Ганиев И.Н., Отаджонов С.Э., Иброхимов Н.Ф., Махмудов М. // *Изв. вузов. Материалы электронной техники.* 2018. Т.21. №1. С. 35–42.
  18. Влияние стронция на температурную зависимость удельной теплоемкости и изменение термодинамических функций сплава АЖ5К10 / Якубов У.Ш., Ганиев И.Н., Махмадизода М.М., Сафаров А.Г., Ганиева Н.И. // *Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия естественных наук.* 2018. №3. С. 61–67.
  19. Влияния иттрия на удельную теплоемкость и изменение термодинамических функции сплава АЖ2.18 / Эсанов Н.Р., Ганиев И.Н., Хакимов А.Х., Иброхимов Н.Ф. // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия техника технология.* 2018. Т.8. №2 (27). С. 75–84.
  20. Умаров М.А., Ганиев И.Н. Температурная зависимость теплоемкости и изменение термодинамических функций свинца марки С2 // *Известия Самарского научного центра РАН.* 2018. Т.20. №1. С. 23–29.
  21. Температурная зависимость теплоемкости и изменение термодинамических функции сплавов системы Pb–Ba / Муллоева Н.М., Ганиев И.Н., Эшов Б.Б., Аминбекова М.С. // *Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна.* 2018. №2. С. 69–75.
  22. Зиновьев В.Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах. М.: Металлургия, 1989. 384 с.

Поступила 23.07.19

Принята в печать 09.09.19

## INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-4-34-43>

## THERMOPHYSICAL PROPERTIES AND THERMODYNAMIC FUNCTIONS OF ALUMINUM-MAGNESIUM ALLOY AMG2 WITH INDIUM

**Izatullo N. Ganiev** – DrSc (Chem.), Academician of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan, Professor Osimi Tajik Technical University, Dushanbe, Tajikistan. E-mail: ganiev48@mail.ru

**Khilola Ya. Sharipova** – Senior Lecturer Khatlon State Medical University. E-mail: simran.77@mail.ru

**Khaydar O. Odinizoda** – DrSc (Eng.), Professor, Corresponding Member, the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan, Rector Osimi Tajik Technical University, Dushanbe, Tajikistan. E-mail: haydar.odinizoda@mail.ru

**Nasim F. Ibrokhimov** – PhD (Eng.), Associate Professor Osimi Tajik Technical University, Dushanbe, Tajikistan. E-mail: nasimqon@mail.ru

**Nargis I. Ganieva** – PhD (Eng.), Associate Professor Osimi Tajik Technical University, Dushanbe, Tajikistan. E-mail: n.ganieva1977@mail.ru



**Abstract. Problem Statement (Relevance):** The use of aluminum and its alloys as structural materials is due to their corrosion resistance. Aluminum-magnesium alloys have high corrosion resistance in atmospheric and marine conditions, in alkaline solutions and low density acid solutions, and good machining properties. The corrosion resistance of these alloys significantly exceeds the resistance of cast alloys of other aluminum-based systems. A main reason for high corrosion resistance of aluminum-magnesium alloys in various solutions is the formation of a hydrate film that delays the corrosion process. High strength of the alloys of this system is explained by an increase in the distortion of the crystal lattice with an increase in the magnesium content in the solid solution. To improve the corrosion and mechanical properties, aluminum-magnesium alloys are supplemented with additives of various metals. One of the most important characteristics of aluminum-magnesium alloys is heat capacity. Measurement of heat capacity and its temperature dependence play a major role in studies on alloys. There is no information in the literature on the effect of indium additives on the heat capacity of the AMg<sub>2</sub> aluminum-magnesium alloy. **Objective:** study of the temperature dependence of the thermophysical properties and thermodynamic functions of the AMg<sub>2</sub> aluminum-magnesium alloy with indium. **Methods Used:** There are many described methods for measuring the heat capacity of solids. In this paper we use the method of comparing the cooling curves of the reference and test samples in the "cooling" mode using a copper standard (Cu grade M00) in the range of 300-800 K. **Novelty:** For the first time, the effect of indium additives on the thermophysical properties and changes in the thermodynamic functions of the AMg<sub>2</sub> aluminum-magnesium alloy was studied. **Findings:** We identified mathematical models describing the temperature dependence of the heat capacity of the AMg<sub>2</sub> alloy on the indium content and changes in their thermodynamic functions in the indicated temperature range. As a result of the studies, it was shown that with increasing temperature the heat capacity, enthalpy and entropy of the alloys increase, and the value of the Gibbs energy decreases. Additives of indium in the AMg<sub>2</sub> alloy slightly reduce the value of these functions. **Practical Relevance:** The obtained characteristics of the thermophysical properties and thermodynamic functions of the AMg<sub>2</sub> aluminum-magnesium alloy with indium will be added to the corresponding handbooks of thermophysics of materials and may be used in the design of parts and machines from these alloys.

**Keywords:** AMg<sub>2</sub> aluminum alloy, indium, heat capacity, "cooling" mode, enthalpy, entropy, Gibbs energy.

#### References

- Ibrokhimov N.F., Ganiev I.N., Odinaev Kh.O. *Fizikokhimiya splava AMg<sub>2</sub> s redkozemelnyimi metallami* [Physicochemistry of AMg<sub>2</sub> alloy with rare earth metals]. Dushanbe: Osimi TTU, 2016, 153p. (In Russ.)
- Umarova T.M., Ganiev I.N. *Korroziya dvoynnykh alyuminiyevykh spлавov v neitralnykh sredakh* [Corrosion of double aluminum alloys in neutral media]. Dushanbe: Donish, 2007, 258p. (In Russ.)
- Sanad S.H., Ismail A.A. Corrosion of Al-Mg alloys in sodium chloride solution. *Corros. Prev. and Contr.*, 1982, 29, no. 5, pp. 21–23.
- Rohlfis U., Kaiser H., Kaesche H. Metallkundliche und elektrische Untersuchungen über die interkristalline Korrosion an einer AlMg-9,56 Knetlegierung. *Verst. und Korros.*, 1979, 30, no. 8, pp. 529–535.
- Cherepakova G.L., Shreider A.V. Study of the effect of cooling water ions on pitting corrosion of the Al-Mg alloy. *Zhurnal prikladnoy khimii* [Journal of Applied Chemistry], 1972, vol. 45, iss. 9, pp. 1958–1963. (In Russ.)
- Ahmed Zaki. Corrosion and corrosion prevention of Al – alloys in desalination plants: a review. *Solution. Anti-Corros. Meth. And Mater.*, 1981, 28, no. 6, pp. 4–7.
- Muller I.L., Galvele J.R. Pitting potential of high purity binary aluminum alloys. *Corros. Sci.*, 1977, 17, no. 12, pp. 995–1007.
- Kirov S.A., Saletsky A.M., Kharabadze D.E. *Izuchenie yavleniya perenosa v vozdukh. Opisanie zadachi #219 obshchego fizicheskogo praktikuma "Molekulyarnaya fizika" Fizicheskogo fakulteta MGU* [Study of airborne transport phenomena. Task description No. 219 of the general workshop on physics "Molecular Physics" at the Physics Department of MSU]. Moscow: OOP Physics Department of MSU, 2013, 22 p. (In Russ.)
- Matveev A.N. *Molekulyarnaya fizika* [Molecular physics]. Moscow: Binom, 2010, pp. 321–333. (In Russ.)
- Sivukhin D.V. *Obshchiy kurs fiziki* [General course on physics]. Moscow: Fizmatlit, 2006, 544 p. (In Russ.)
- Kikoin A.K., Kikoin I.K. *Molekulyarnaya fizika* [Molecular physics]. Moscow: Lan, 2008, 480 p. (In Russ.)
- Ganiev I.N., Safarov A.G., Odinaev F.R., Yakubov U.Sh., Kabutov K. Temperature dependence of heat capacity and changes in thermodynamic functions of the AZh4.5 alloy with tin. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya* [Izvestiya. Non-ferrous metallurgy], 2019, no. 1, pp. 50–58. (In Russ.)
- Azimov Kh.Kh., Ganiev I.N., Amonov I.T., Ibrokhimov N.F. The effect of lithium on heat capacity and changes in thermodynamic functions of the AZh2.18 aluminum alloy. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2018, vol. 16, no. 1, pp. 37–44. (In Russ.)
- Nazarov Sh.A., Ganiev I.N., Ganieva N.I., Calliari I. Microstructure and mechanical properties of Al + 6% Li alloy with rare earth metals. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2017, vol. 15, no. 2, pp. 63–68. (In Russ.)
- Ganiev I.N., Yakubov U.Sh., Sangov M.M., Safarov A.G. The effects of calcium on the temperature dependence of specific heat capacity and changes in thermodynamic functions of the AZh5K10 aluminum alloy. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of Kazan Technological University], 2018, vol. 21, no. 8, pp. 11–15. (In Russ.)
- Ganiev I.N., Niyozov O.Kh., Safarov A.G., Mulloeva N.M. The effect of strontium on heat capacity and changes in thermodynamic functions of the SSu3 lead alloy. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo instituta (tekhnologicheskogo universiteta)* [Bulletin of the Saint Petersburg State Institute of Technology (Technical University)], 2018, no. 47(73), pp. 36–42. (In Russ.)
- Ganiev I.N., Otadzhonov S.E., Ibrokhimov N.F., Makmudov M. Temperature dependence of heat capacity and changes in

- thermodynamic functions of the AKIM2 alloy doped with strontium. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoy tekhniki* [News of universities. Materials of electronics engineering], 2018, vol. 21, no. 1, pp. 35–42. (In Russ.)
18. Yakubov U.Sh., Ganiev I.N., Makhmadizoda M.M., Safarov A.G., Ganieva N.I. The effect of strontium on the temperature dependence of specific heat capacity and changes in thermodynamic functions of the AZh5K10 alloy. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta tekhnologii i dizaina. Seriya estestvennykh nauk* [Vestnik of St. Petersburg State University of Technology and Design. Series: Natural sciences], 2018, no. 3, pp. 61–67. (In Russ.)
19. Esanov N.R., Ganiev I.N., Hakimov A.Kh., Ibrokhimov N. F. The influence of yttrium on specific heat capacity and changes in thermodynamic functions of the AZh2.18 alloy. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya tekhnika i tekhnologii* [Proceedings of South-West State University. Series Technics and Technologies], 2018, vol. 8, no. 2 (27), pp.75–84. (In Russ.)
20. Umarov M.A., Ganiev I.N. Temperature dependence of heat capacity and changes in thermodynamic functions of C2 lead. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN* [Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2018, vol.20, no. 1, pp. 23–29. (In Russ.)
21. Mulloeva N.M., Ganiev I.N., Eshov B.B. Aminbekova M.S. Temperature dependence of heat capacity and changes in thermodynamic functions of alloys of the Pb-Ba system. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta tekhnologii i dizaina*. [Vestnik of St. Petersburg State University of Technology and Design], 2018, no. 2, pp. 69–75. (In Russ.)
22. Zinoviev V.E. *Teplofizicheskie svoystva metallov pri vysokikh temperaturakh* [Thermophysical properties of metals at high temperatures]. Moscow: Metallurgy, 1989, 384 p. (In Russ.)

Received 23/07/19

Accepted 09/09/19

---

**Образцы для цитирования**

Теплофизические свойства и термодинамические функции алюминисво-магниевого сплава АМг2 с индием / Ганиев И.Н., Шарипова Х.Я., Одиназова Х.О., Иброхимов Н.Ф., Ганиева Н.И. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2019. Т.17. №4. С. 34–43. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-4-34-43>

**For citation**

Ganiev I.N., Sharipova Kh.Ya., Odinazoda Kh.O., Ibrokhimov N.F., Ganieva N.I. Thermophysical Properties and Thermodynamic Functions of Aluminum-Magnesium Alloy AMg2 with Indium. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2019, vol. 17, no. 4, pp. 34–43. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-4-34-43>

---