

ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК МЕДИ НА ТЕПЛОЕМКОСТЬ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ АЛЮМИНИЯ МАРКИ А7Е

© 2020 г. И.Н. Ганиев, А.Р. Рашидов, Х.О. Одиназода, А.Г. Сафаров, Дж.Х. Джайлоев

Таджикский технический университет им. М.С. Осими, г. Душанбе

Институт энергетики Таджикистана, г. Бохтариён

Физико-технический институт им. С.У. Умарова АН Респ. Таджикистан, г. Душанбе

Институт химии им. В.И. Никитина АН Респ. Таджикистан, г. Душанбе

Статья поступила в редакцию 19.08.19 г., доработана 13.03.20 г., подписана в печать 18.03.20 г.

Экономическая целесообразность применения алюминия в качестве проводникового материала объясняется благоприятным соотношением его стоимости (которая в течение многих лет практически не меняется) и стоимости меди. При использовании проводниковых алюминиевых сплавов для изготовления тонкой проволоки, обмоточного провода и др. могут возникнуть определенные сложности в связи с их недостаточной прочностью и малым числом перегибов до разрушения. В последние годы разработаны алюминиевые сплавы, которые даже в мягком состоянии обладают прочностными характеристиками, позволяющими применять их в качестве проводникового материала. Одним из перспективных потребителей алюминия является электротехническая промышленность. Отсюда разработка новых составов сплавов на основе этого металла весьма актуальна. Экспериментально определена температурная зависимость теплоемкости сплавов алюминия марки А7Е с медью и выполнен расчет изменений их термодинамических функций. Исследования проводились в режиме охлаждения с применением компьютерной техники и программы «Sigma Plot». Установлены полиномы температурной зависимости теплоемкости и изменения термодинамических функций (энтальпии, энтропии и энергии Гиббса) указанных сплавов и эталона (А1 марки А5N), характеризующие коэффициентом корреляции $R_{\text{корр}} = 0,992 \div 0,998$. Показано, что с ростом содержания меди теплоемкость сплавов алюминия марки А7Е снижается, а с увеличением температуры повышается. Энтальпия и энтропия сплавов алюминия марки А7 с медью с увеличением доли меди уменьшаются, а с ростом температуры повышаются. Для энергии Гиббса характерна обратная зависимость.

Ключевые слова: алюминий марки А7Е, медь, эталон (А1 марки А5N), теплоемкость, режим «охлаждения», энтальпия, энтропия, энергия Гиббса.

Ганиев И.Н. — докт. хим. наук, акад. АН Респ. Таджикистан, проф., зав. лабораторией «Коррозионно-стойкие материалы» Института химии им. В.И. Никитина АН Респ. Таджикистан (734063, Респ. Таджикистан, г. Душанбе, ул. Айни, 299/2). E-mail: ganiev48@mail.ru.

Рашидов А.Р. — стар. препод. кафедры «Автоматизированный электропривод» Института энергетики Таджикистана (735162, Респ. Таджикистан, обл. Хатлон, г. Бохтариён, ул. Носири Хусрав). E-mail: rashidov0909@mail.ru.

Одиназода Х.О. — докт. техн. наук, проф., чл.-кор. АН Респ. Таджикистан, ректор Таджикского технического университета им. М.С. Осими (734042, Респ. Таджикистан, г. Душанбе, пр. акад. Раджабовых, 10). E-mail: haydar.odinazoda@mail.ru.

Сафаров А.Г. — канд. хим. наук, вед. науч. сотр. Физико-технического института им. С.У. Умарова АН Респ. Таджикистан (734064, Респ. Таджикистан, г. Душанбе, ул. Айни, 299/1). E-mail: amirsho71@mail.ru.

Джайлоев Дж.Х. — ст. науч. сотр. Института химии им. В.И. Никитина АН Респ. Таджикистан. E-mail: husenzod85@mail.ru.

Для цитирования: Ганиев И.Н., Рашидов А.Р., Одиназода Х.О., Сафаров А.Г., Джайлоев Дж.Х. Влияние добавок меди на теплоемкость и термодинамические функции алюминия марки А7Е. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2020. No. 3. С. 4–12. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2020-3-4-12.

Ganiyev I.N., Rashidov A.R., Odinazoda H.O., Safarov A.G., Jayloev J.H.

The effect of copper additives on the heat capacity and thermodynamic functions of А7Е grade aluminum

The economic feasibility of using aluminum as a conductive material is explained by the favorable ratio of its cost to the cost of copper. In addition, one should take into account the factor that the cost of aluminum remains practically unchanged for many years. When

using conductive aluminum alloys for the manufacture of thin wire, winding wire, etc. certain difficulties may arise in connection with their insufficient strength and a small number of kinks before fracture. In recent years, aluminum alloys have been developed with strength characteristics that allow them to be used as a conductive material even in a soft state. One of the promising applications of aluminum is the electrical industry. Hence, the development of new alloy compositions based on this metal is very relevant. The temperature dependence of the heat capacity of A7E grade aluminum alloys with copper was experimentally determined, and changes in their thermodynamic functions were calculated. The studies were carried out in cooling mode using computer hardware and Sigma Plot software. Polynomials were established for the temperature dependence of the heat capacity and changes in thermodynamic functions (enthalpy, entropy, and Gibbs energy) of these alloys and a reference standard (A5N grade Al) characterized by a correlation coefficient $R_{\text{corr}} = 0.992 \div 0.998$. It was shown that the heat capacity of A7E grade aluminum decreases with increasing copper content, and increases with rising temperature. The enthalpy and entropy of A7 grade aluminum alloys with copper decrease with increasing copper content, and increase with rising temperature. The value of Gibbs energy is characterized by an inverse relationship.

Keywords: A7E grade aluminum, copper, reference standard (A5N grade Al), heat capacity, «cooling» mode, enthalpy, entropy, Gibbs energy.

Ganiyev I.N. — Dr. Sci. (Chem.), acad. of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan, prof., head of Laboratory «Corrosion-resistant materials» of the Institute of Chemistry n.a. V.I. Nikitin of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan (734063, Republic of Tajikistan, Dushanbe, Aini str., 299/2). E-mail: ganiyev48@mail.ru.

Rashidov A.R. — senior teacher of the Department «Automated electric drive» of the Institute of Energy of Tajikistan (735162, Republic of Tajikistan, Khatlon region, Bohtariyon, Nosiri Khusrav str.). E-mail: rashidov0909@mail.ru.

Odinazoda H.O. — Dr. Sci. (Tech.), prof., corr. of Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan, rector of the Tajik Technical University n.a. M.S. Osimi (734042, Republic of Tajikistan, Dushanbe, Acad. Radjabovs pr., 10). E-mail: haydar.odinazoda@mail.ru.

Safarov A.G. — Cand. Sci. (Chem.), leading researcher of the Physical-Technical Institute n.a. S.U. Umarov of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan (734064, Republic of Tajikistan, Dushanbe, Aini str., 299/1). E-mail: amirsho71@mail.ru.

Jayloev J.H. — senior researcher of the Institute of Chemistry n.a. V.I. Nikitin of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan. E-mail: husenzod85@mail.ru.

Citation: Ganiyev I.N., Rashidov A.R., Odinazoda H.O., Safarov A.G., Jayloev J.H. The effect of copper additives on the heat capacity and thermodynamic functions of A7E grade aluminum. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya (Universities' Proceedings. Non-Ferrous Metallurgy)*. 2020. No. 3. P. 4–12 (In Russ.).

DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2020-3-4-12.

Введение

В литературе сообщается о различных физико-химических свойствах сплавов алюминия с меди. В частности, авторами [1] исследована теплоемкость алюминия марок ОСЧ (особой степени чистоты — 99,9995 % Al) и A7E в режиме «охлаждения». Сравнение полученных результатов с данными [2–4] показало удовлетворительное совпадение. Так, для алюминия марки A7E при $T = 600$ К в [3] $C_p^0 = 1036,04$ Дж/(кг·К), а в [1] — 1030,58 Дж/(кг·К). При этой же температуре для алюминия марки ОСЧ в [4] $C_p^0 = 1140$ Дж/(кг·К), в [1] — 1132,48 Дж/(кг·К).

Сведения о влиянии меди на теплоемкость алюминия ограничены, а имеющиеся охватывают в основном группу промышленных сплавов на основе систем Al—Cu—Mn (Mg). Так, для промышленных сплавов Д20 и Д21, содержащих 5,8–7,0 % Cu и 0,2–0,8 % Mn теплоемкость при $T = 573$ К составляет 1100–964 Дж/(кг·К).

К проводниковым материалам предъявляются такие требования, как высокие механические свойства и электропроводность, устойчивость к атмосферной коррозии и способность поддаваться механической

обработке давлением. В этом плане главным недостатком алюминия как проводника является низкая механическая прочность — например, для алюминия марки А5 показатель $\sigma_b = 14,7$ кг/мм².

Имеются сведения об электросопротивлении сплавов Al—Cu, которое возрастает почти пропорционально количеству растворенной меди [5–9]. С повышением ее содержания происходит непрерывное увеличение твердости. Прочность и пластичность сплавов зависят от вида нахождения меди в твердом растворе [10–12].

Анализ литературных данных показывает, что легирование алюминия медью незначительно снижает его проводимость, — так, добавка 0,25 мас.% Cu уменьшает проводимость сверхчистого алюминия с 38 до 37 м/(Ом·мм²) [13, 14].

Сведений о термодинамических свойствах сплавов алюминия с меди нами обнаружено не было. В связи с этим цель настоящих исследований — установление влияния добавок меди на теплоемкость и термодинамические функции алюминия марки A7E.

Теория метода и описание установки

Сплав алюминия с медью получали в шахтной лабораторной печи сопротивления типа СШОЛ при температуре 750—800 °С путем добавления в расплав алюминия расчетного количества меди марки М995. Первичный алюминий и сплавы, которые содержали 0,01—0,5 мас.% меди, подвергались химическому анализу в центральной заводской лаборатории ГУП «ТАЛКо» (г. Турсунзаде, Респ. Таджикистан). Взвешиванием контролировали массу шихты и полученных сплавов. Было установлено, что первичный алюминий по химическому составу (0,08 % Si; 0,15 % Fe и 0,007 % Cu) соответствует металлу марки А7Е. При отклонении массы сплавов более чем на 1—2 отн.% синтез сплавов проводили заново. Из полученных таким образом расплавов в металлический кокиль отливались цилиндрические образцы диаметром 16 мм и длиной 30 мм.

Один из методов определения теплоемкости материалов заключается в сравнении кривых охлаждения (термограмм — зависимостей температуры от времени) двух образцов, один из которых служит эталоном с известной теплоемкостью [15, 16].

Физические основы предлагаемого метода измерения состоят в следующем. Механизм теплопередачи образцов при охлаждении обусловлен теплопроводностью окружающей среды, конвекцией и излучением. Для первых двух процессов (теплопроводности среды и конвекции) считается, что тепловой поток от нагретого тела (J) пропорционален разности между температурой поверхности образца (T) и температурой окружающей среды (T_0) (закон Ньютона—Рихмана):

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

На практике коэффициент теплоотдачи α определяется экспериментально, так как он зависит от большого количества параметров и не может быть описан общей формулой. Тепловой поток за счет излучения имеет качественно иную зависимость от температуры (закон Стефана—Больцмана):

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

где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴), ϵ — коэффициент поглощения, S — площадь поверхности тела. Только при небольшой разности температур ($T - T_0$) величина J сводится к виду

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

Температура при охлаждении тела будет спадать по экспоненте, если теплоемкость и коэффициент теплопередачи постоянны, а окружающая среда бесконечна и однородна. Действительно, уравнение теплового баланса

$$dQ = -Jdt \quad (4)$$

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 [17, 18].

При условии выполнения всех вышеуказанных требований теплоемкость материала образца определяется из измеренного по термограмме параметра релаксации τ . Поскольку величина α не известна, параллельные измерения необходимо выполнить и с эталонным образцом с известной теплоемкостью и теми же размерами, при этом условия охлаждения должны быть идентичными. Допуская, что коэффициент α у обоих образцов одинаков, теплоемкость измеряемого материала можно найти по формуле

$$C_x^0 = C_3^0 \frac{m_3 \tau_x}{m_x \tau_3}, \quad (7)$$

где C_3^0 — теплоемкость эталонного материала; m_x и m_3 — массы исследуемого и эталонного образцов; t_x и t_3 — измеренное время тепловой релаксации для этих образцов: $t_3 = (dT/dt)_1$ и $t_x = (dT/dt)_2$.

Данный метод допускает:

- постоянство C_x , C_3 и α при изменении температуры;
- охлаждение в бесконечной среде;
- температуры образцов, при которых излучением можно пренебречь по сравнению с теплопроводностью и конвекцией.

Несоблюдение какого-либо из указанных условий нарушает экспоненциальный ход кривой охлаждения [17, 18].

Разбив термограмму на узкие интервалы температур, в которых теплоемкости и коэффициент α можно считать постоянными, можно определить зависимости C_x и C_3 от температуры. При этом для каждого температурного интервала находят свои параметры тепловой релаксации $t_x(T)$ и $t_3(T)$, которые и используются для расчета $C_x(T)$.

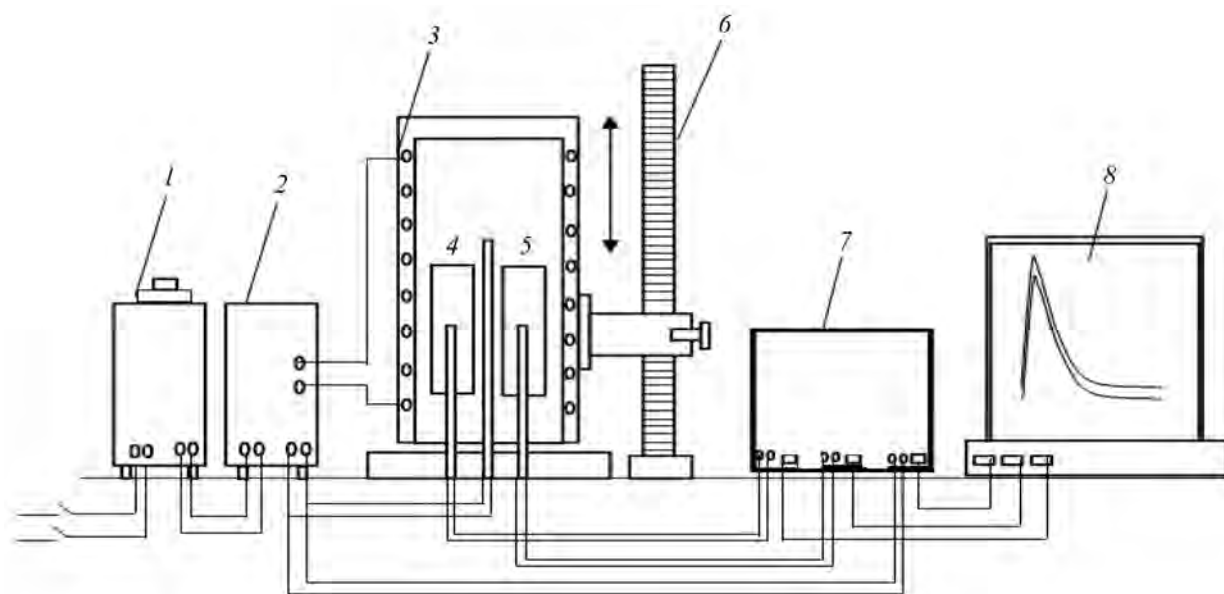


Рис. 1. Схема установки для определения теплоемкости твердых тел в режиме «охлаждения»

1 – автотрансформатор, 2 – терморегулятор, 3 – электропечь, 4 – измеряемый образец, 5 – эталон, 6 – стойка электропечи, 7 – многоканальный цифровой термометр, 8 – регистрирующий прибор (компьютер)

В данной работе определены средние теплоемкости по всему измеряемому интервалу температур. Для всех образцов коэффициенты теплопередачи α предполагаются одинаковыми.

Далее строят кривые охлаждения эталона и исследуемых образцов, которые используются для определения скоростей охлаждения t_3 и t_x . Кривая охлаждения, т.е. термограмма, представляет собой зависимость температуры образца от времени при его охлаждении в неподвижном воздухе.

Измерение теплоемкости проводилось по методике, описанной в работах [19–22]. Схема установки [23] представлена на рис. 1. Она включает электропечь 3, которая смонтирована на стойке 6 и может перемещаться вверх и вниз (стрелкой показано направление перемещения). Образец 4 и эталон 5 (которые тоже могут перемещаться) представляют собой цилиндры длиной 30 мм диаметром 16 мм. С одного конца образцов высверлены каналы, в которые вставляются термопары. К цифровому многоканальному термометру 7, подсоединенному к компьютеру 8, подведены концы термопар.

Теплоемкость сплавов алюминия марки А7Е с медью измеряли в режиме «охлаждения». В качестве эталона использовался алюминий особой степени чистоты марки А5N (99,9995 % Al), полученный зонной очисткой. Построение графиков и обработка результатов измерений производились

с помощью программ «MS Excel» и «Sigma Plot». Величина коэффициента корреляции составила $R_{\text{корр}} = 0,992 \div 0,998$. Временной интервал фиксации температуры выбран 10 с. Относительная погрешность измерения температуры в интервале от 40 до 400 °С составляла $\pm 1\%$, при больших температурах (>400 °С) была $\pm 2,5\%$. В предлагаемой методике погрешность измерения теплоемкости не превышает 4 %.

Результаты и их обсуждение

Экспериментально полученные кривые охлаждения образцов из сплавов алюминия марки А7Е с медью представлены на рис. 2. Полученные термограммы $T = f(\tau)$ для образцов описываются уравнением вида

$$T = a \exp(-b\tau) + p \exp(-k\tau), \quad (8)$$

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

Дифференцируя уравнение (8) по τ , получаем уравнение, с помощью которого можно определить скорости охлаждения сплавов:

$$dT/d\tau = abe^{-b\tau} + pke^{-k\tau}. \quad (9)$$

Экспериментально полученные термограммы (рис. 2, а) и графики скорости охлаждения образ-

Таблица 1

Значения коэффициентов в уравнении (9) для сплавов алюминия марки А7Е с медью и эталона (А1 марки А5N)

Содержание меди в сплаве с алюминием марки А7Е, мас. %	a , К	b , $с^{-1}$	p , К	$k \cdot 10^{-4}$, $с^{-1}$	ab , $К \cdot с^{-1}$	$pk \cdot 10^{-2}$, $К \cdot с^{-1}$
0	473,78	4,62	336,19	1,46	2,19	4,91
0,01	473,84	4,62	336,13	1,46	2,19	4,91
0,05	471,69	4,61	335,73	1,45	2,18	4,86
0,1	471,16	4,61	336,07	1,46	2,17	4,92
0,5	467,36	4,61	335,55	1,45	2,16	4,86
Эталон	475,37	4,63	337,25	1,49	2,20	5,03

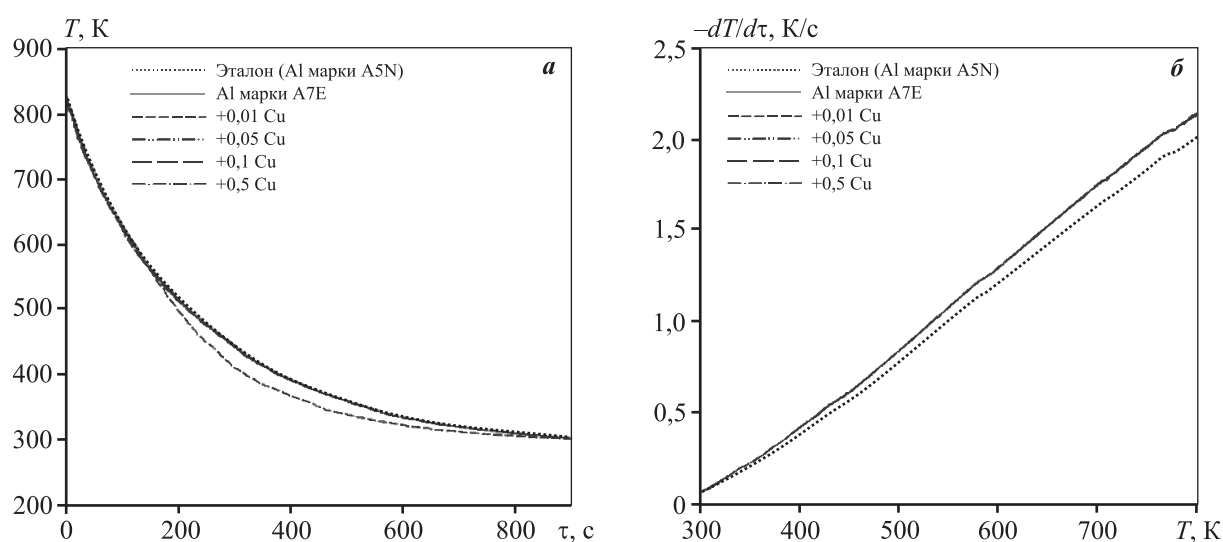


Рис. 2. График зависимости температуры от времени охлаждения (а) и скорости охлаждения (б) для образцов из сплавов алюминия марки А7Е с медью и эталона (А1 марки А5N)

цов из сплавов (рис. 2, б) описываются полиномами (8) и (9). Проведя компьютерную обработку уравнения (9), были установлены значения коэффициентов a , b , p , k , ab , pk для исследованных сплавов, которые приведены в табл. 1.

Используя рассчитанные значения величин скорости охлаждения образцов, по уравнению (7) была вычислена удельная теплоемкость сплавов алюминия марки А7Е с медью. Результаты расчета свидетельствуют, что температурная зависимость удельной теплоемкости этих сплавов и эталона (А1 марки А5N) описывается уравнением вида

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

Значения коэффициентов полинома (10) получены в результате их расчета по программе «Sigma Plot» и представлены в табл. 2.

На рис. 3 и в табл. 3 приведены результаты расчета температурной зависимости теплоемкости по формулам (7) и (10) через каждые 100 К.

Из табл. 3 видно, что теплоемкость сплавов с ростом содержания меди уменьшается, а с повышением температуры — увеличивается. Установленные значения теплоемкости алюминия марки А7Е хорошо согласуются с литературными данными [3].

Рассчитанная по уравнению (5) температурная зависимость коэффициента теплоотдачи сплавов алюминия марки А7Е с медью и эталона (А1 марки А5N) представлена на рис. 3, б. С ростом температуры и содержания меди в алюминии коэффициент теплоотдачи увеличивается.

Расчет температурной зависимости изменений энтальпии, энтропии и энергии Гиббса сплавов проводился с использованием интеграла от поли-

Таблица 2

Значения коэффициентов уравнения (10) для образцов из сплавов алюминия марки А7Е с медью и эталона (А1 марки А5N)

Содержание меди в сплаве с алюминием марки А7Е, мас. %	a , Дж/(кг·К)	b , Дж/(кг·К ²)	$c \cdot 10^{-2}$, Дж/(кг·К ³)	$d \cdot 10^{-6}$, Дж/(кг·К ⁴)	Коэффициент корреляции $R_{\text{корр}}$, %
0	282,80	1,99	0,155	0,516	0,9963
0,01	281,69	2,00	0,156	0,522	0,9933
0,05	274,55	2,05	0,167	0,595	0,9932
0,1	306,32	1,87	0,137	0,425	0,9934
0,5	301,40	1,86	0,136	0,417	0,9934
Эталон	645,88	0,36	0,15	1,24	1,0

Таблица 3

Температурная зависимость удельной теплоемкости (Дж/(кг·К)) сплавов алюминия марки А7Е с медью и эталона (А1 марки А5N)

Содержание меди в сплаве с алюминием марки А7Е, мас. %	T , К					
	325	400	500	600	700	800
0	756,69	867,11	958,90	1035,18	1099,03	1153,55
0,01	756,71	867,26	959,15	1035,49	1099,42	1154,08
0,05	755,34	865,52	956,63	1032,25	1095,95	1151,34
0,1	755,11	861,80	951,29	1026,14	1088,88	1142,08
0,5	748,26	854,49	943,52	1017,87	1080,03	1132,50
Эталон	854,61	949,47	1044,57	1132,48	1205,74	1256,92

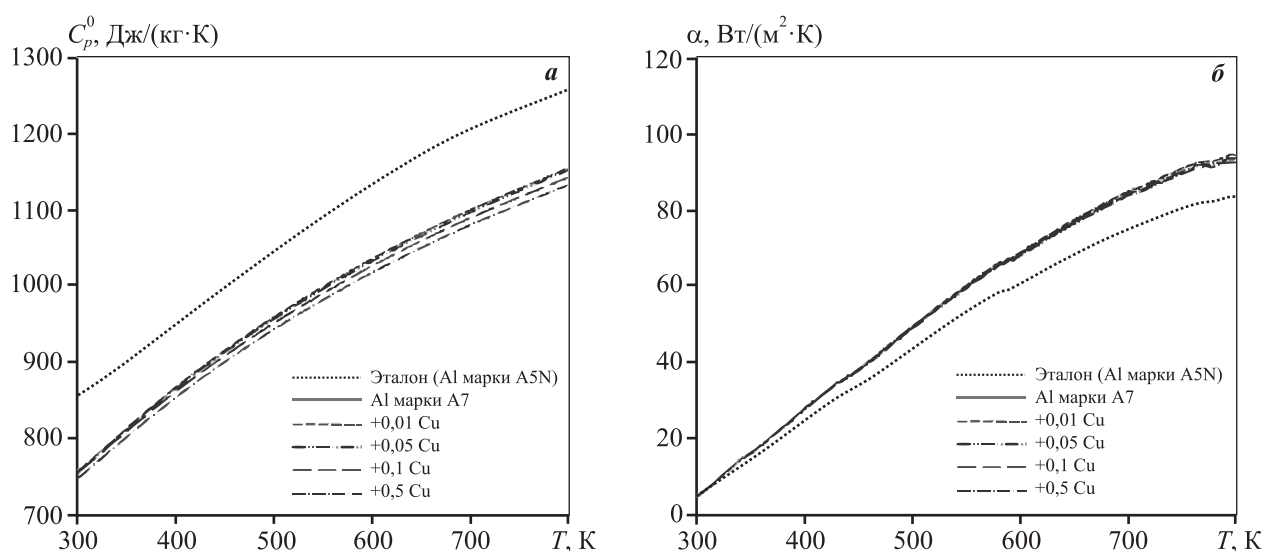


Рис. 3. Температурная зависимость удельной теплоемкости (а) и коэффициента теплоотдачи (б) сплавов алюминия марки А7Е с медью и эталона (А1 марки А5N)

нома удельной теплоемкости (10) по следующим уравнениям:

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

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

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

где $T_0 = 298,15$ К.

Результаты расчета представлены в табл. 4.

Зависимость теплоемкости от температуры является уникальной характеристикой каждого индивидуального вещества и позволяет сделать вывод о строении молекул, их взаимодействии и энергии взаимодействия атомов в молекулах. Рост теплоемкости с повышением температуры [15, 16] объясняется постепенным возбуждением новых степеней свободы молекул (колебательных и вращательных), что требует теплоты.

Заключение

В режиме охлаждения по известной теплоемкости эталонного образца из алюминия марки А5N установлена температурная зависимость тепло-

Таблица 4

Температурная зависимость изменений термодинамических функций сплавов алюминия марки А7Е с медью и эталона (Al марки А5N)

Содержание меди в сплаве с алюминием марки А7Е, мас. %	T, К					
	325	400	500	600	700	800
$[H^0(T) - H^0(T_0^*)], \text{ кДж/кг}$						
0	1,398	82,756	174,199	274,019	380,821	493,515
0,01	1,398	82,765	174,229	274,077	380,913	493,652
0,05	1,395	82,604	173,837	273,361	379,800	492,134
0,1	1,395	82,394	173,182	272,165	378,007	489,624
0,5	1,382	81,673	171,706	269,888	374,874	485,571
Эталон	1,579	91,751	191,483	300,427	417,491	540,839
$[S^0(T) - S^0(T_0^*)], \text{ кДж/(кг·К)}$						
0	0,005	0,238	0,442	0,623	0,788	0,938
0,01	0,005	0,238	0,442	0,624	0,788	0,939
0,05	0,005	0,238	0,441	0,622	0,786	0,936
0,1	0,005	0,237	0,439	0,619	0,782	0,931
0,5	0,005	0,235	0,435	0,614	0,776	0,924
Эталон	0,005	0,264	0,486	0,685	0,865	1,030
$[G^0(T) - G^0(T_0^*)], \text{ кДж/кг}$						
0	-0,004	-12,430	-46,618	-100,030	-170,727	-257,146
0,01	-0,004	-12,431	-46,624	-100,046	-170,757	-257,196
0,05	-0,004	-12,408	-46,529	-99,825	-170,349	-256,543
0,1	-0,004	-12,385	-46,400	-99,490	-169,713	-255,513
0,5	-0,004	-12,276	-45,996	-98,636	-168,270	-253,354
Эталон	-0,005	-13,863	-51,610	-110,315	-187,925	-282,770

* $T_0 = 298,15$ К.

емкости сплавов алюминия марки А7Е с медью. Определены полиномы, описывающие температурную зависимость теплоемкости и изменений термодинамических функций (энтальпии, энтропии, энергии Гиббса) сплавов алюминия марки А7Е с медью в интервале температур 325–800 К. С их помощью показано, что с ростом температуры теплоемкость, энтальпия и энтропия этих сплавов увеличиваются, а значения энергии Гиббса уменьшаются. В изученном концентрационном интервале (0,01–0,5 мас.%) добавки меди снижают теплоемкость, энтальпию и энтропию сплавов алюминия, а значение энергии Гиббса при этом увеличивают. Указанные изменения термодинамических функций сплавов системы Al–Cu объясняются ростом возбуждения новых степеней свободы атомов сплавов с увеличением температуры и содержания меди в них, а также структурными изменениями, происходящими при легировании алюминия медью.

Литература/References

1. 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. Докл. АН Респ. Таджикистан. 2011. Т. 54. No. 1. С. 53–59.
Nizomov Z., Gulov B., Ganiev I.N., Saidov R.Kh., Obidov F.U., Eshov B.B. Study of the temperature dependence of the specific heat of aluminum grades OSCh and A7. *Doklady AN Respubliki Tadjhikistan*. 2011. Vol. 54. No. 1. P. 53–59 (In Russ.).
2. Золоторевский В.С., Белов Н.А. Металловедение литейных алюминиевых сплавов. М.: МИСиС, 2005.
Zolotarevskii V.S., Belov N.A. Metallurgy of foundry aluminum alloys. Moscow: MISIS, 2005 (In Russ.).
3. Белецкий В.М., Кривов Г.А. Алюминиевые сплавы (состав, свойства, технология, применение): Справочник. Под ред. И.Н. Фридляндера. Киев: КОМИТЕХ, 2005.
Beletskii V.M., Krivov G.A. Aluminum alloys (structure, properties, technology, application). Ed. I.N. Fridlyander. Kiev: KOMITEKh, 2005 (In Russ.).
4. Маджидов Х., Аминов Б., Сафаров М., Вахобов А., Обидов Ф.У. Теплоемкость особо чистого алюминия в зависимости от температуры. Докл. АН Респ. Таджикистан. 1990. Т. 33. No. 6. С. 380–383.
Madzhidov Kh., Aminov B., Safarov M., Vakhobov A., Obidov F.U. Heat capacity of highly pure aluminum depending on temperature. *Doklady AN Respubliki Tadjhikistan*. 1990. Vol. 33. No. 6. P. 380–383 (In Russ.).
5. Усов В.В., Займовский А.С. Проводниковые, реостатные и контактные материалы. Материалы и сплавы в электротехнике. Т. II. М.: Госэнергоиздат, 1957.
Usov V.V., Zaimovskii A.S. Conductor, rheostat and contact materials. Materials and alloys in electrical engineering. Vol. II. Moscow: Gosenergoizdat, 1957 (In Russ.).
6. Somasekharan A.C., Murr L.E. Microstructures in friction-stir welded dissimilar magnesium alloys and magnesium alloys to 6061-T6 aluminum alloy. *Mater. Character.* 2004. Vol. 52. No. 1. P. 49–64.
7. Menan F., Henaff G. Synergistic action of fatigue and corrosion during crack growth in the 2024 aluminum alloy. *Procardia Eng.* 2010. Vol. 2. No. 1. P. 1441–1450.
8. Hu X.W., Jiang F.G., Yan H. Effects of rare earth Er additions on microstructure development and mechanical properties of die-cast ADC12 aluminum alloy. *J. Alloys Compd.* 2012. P. 538–544.
9. Fragomeni J., Wheeler R., Jata K.V. Effect of single and duplex aging on precipitation response, microstructure, and fatigue crack behavior in Al–Li–Cu alloy AF/C-458. *J. Mater. Eng. Perform.* 2005. Vol. 14. No. 1. P. 18–27.
10. Мондольфо Л.Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов. М.: Metallurgia, 1979.
Mondolfo L.F. Structure and properties of aluminum alloys. Moscow: Metallurgiya, 1979 (In Russ.).
11. Yan X.Y., Chang Y.A., Xie F.Y., Chen S.L., Zhang F., Daniel S. Calculated phase diagrams of aluminum alloys from binary Al–Cu to multicomponent commercial alloys. *J. Alloys Compd.* 2001. Vol. 320. No. 2. P. 151–160.
12. Liu L., Ren D., Liu F. A review of dissimilar welding techniques for magnesium alloys to aluminum alloys. *Materials*. 2014. Vol. 7. No. 5. P. 3735–3757.
13. Wang M.J., Chen L., Wang Z.X. Effect of rare earth addition on continuous heating transformation of a high speed steel for rolls. *J. Rare Earths*. 2012. Vol. 30. P. 84–89.
14. Chen X.G. Growth mechanisms of intermetallic phases in DC cast AA1XXX alloys. *Essential Readings in Light Metals*. Vol. 3. Cast shop for aluminum production. 2013. P. 460–465.
15. Иванцов Г.П. Нагрев металла (теория и методы расчета). Свердловск; М.: Metallurgizdat, 1948.
Ivantsov G.P. Heating of metal (theory and methods of calculation). Sverdlovsk; Moscow: Metallurgizdat, 1948 (In Russ.).
16. Багницкий В.Е. Обратные связи в физических явлениях. Германия: LAP (Lambert Acad. Publ.), 2014.
Bagnitskii V.E. Feedback in the physical phenomena. Germany: LAP (Lambert Acad. Publ.), 2014 (In Russ.).

17. Киров С.А., Салецкий А.М., Харабадзе Д.Э. Изучение явлений переноса в воздухе. Описание задачи No. 219 общего физического практикума «Молекулярная физика». М.: ООП Физ. фак-та МГУ, 2013.
Kirov S.A., Saletskii A.M., Kharabadze D.E. The study of transport phenomena in the air. Description of problem No. 219 of the general physical workshop «Molecular physics». Moscow: OOP Fiz. facul'teta MGU, 2013 (In Russ.).
18. Булкин П.С., Попова И.И. Общий физический практикум. Молекулярная физика. М.: Изд-во МГУ, 1988.
Bulkin P.S., Popova I.I. General physical workshop. Molecular physics. Moscow: MGU, 1988 (In Russ.).
19. Ganiev I.N., Safarov A.G., Odinaev F.R., Yakubov U.Sh., Kabutov K. Temperature dependence of the specific heat and the changes in the thermodynamic functions of a bismuth-bearing AZh4.5 alloy. *Russ. Metallurgy (Metally)*. 2020. Vol. No. 1. P. 17–24.
20. Ganiev I.N., Nazarova M.T., Yakubov U.Sh., Safarov A.G., Kurbonova M.Z. Influence of lithium on specific heat capacity and changes in the thermodynamic functions of aluminum alloy AB1. *High Temp.* 2020. Vol. 58. No. 1. P. 58–63.
21. Ganiev I.N., Safarov A.G., Odinaev F.R., Yakubov U.Sh., Kabutov K. Temperature dependence of heat capacity and the variation in thermodynamic function of the AZh 4.5 alloy doped with tin. *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 2019. Vol. 60. No. 2. P. 139–145.
22. Obidov Z. Thermophysical properties and thermodynamic functions of the beryllium, magnesium, and praseodymium alloyed Zn-55Al alloy. *High Temp.* 2017. Vol. 55. No. 1. P. 150–153.
23. Ганиев И.Н., Муминов Х.Х., Ганиева Н.И. и др. Установка для определения теплоемкости и теплопроводности твердых тел: Пат. TJ877 (Тадж.). 2017.
Ganiev I.N., Muminov Kh.Kh., Ganieva N.I. et al. Installation for determination of heat capacity and thermal conductivity of solid bodies: Pat. TJ877 (Tadzhikistan). 2017.

Вышел в свет учебник «**Твердые сплавы**» (авторы: Панов В.С., Коняшин И.Ю, Левашов Е.А., Зайцев А.А.) – издательский дом НИТУ «МИСиС», 2019 г., 398 с.

Даны современные представления о теории и практике твердых сплавов, рассмотрены общие и специальные вопросы технологии производства современных спеченных твердых сплавов, их структурные особенности и свойства. Изложены физико-химические основы получения материалов нового поколения, в том числе наноструктурированных, иерархических, функционально-градиентных твердых сплавов. Освещены технологические процессы получения исходных порошков карбидов, твердосплавных смесей и изделий из них, а также методы контроля полуфабрикатов и готовых изделий. Проанализированы фундаментальные основы металловедения, особенности формирования структуры твердых сплавов, технологии нанесения износостойких покрытий. Даны области применения твердых сплавов в различных отраслях промышленности.

Заказать учебник можно по адресу: 119049, г. Москва, Ленинский пр-т, 4, издательский дом НИТУ «МИСиС», а также по телефонам: (495) 638-44-16, (495) 638-44-43.