

УДК 621.315.5:536.7

Влияние щелочноземельных металлов на теплоемкость и изменение термодинамических функций сплава АК1М2 на основе особо чистого алюминия

© 2020 г. И. Н. Ганиев^{1,§}, С. Э. Отаджонов², М. Махмудов²,
М. М. Махмадизода¹, В. Д. Абулхаев³

¹ *Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими,
ул. Раджабовых, д. 10, Душанбе, 734042, Таджикистан*

² *Худжандский государственный университет им. академика Б. Гафурова,
проезд Мавлонбекова, д. 1, Худжанд, 735700, Таджикистан*

³ *Институт химии им. В. И. Никитина АН Республики Таджикистан,
ул. Садриддина Айни, д. 299/2, Душанбе, 734063, Таджикистан*

Аннотация. В последние годы наметился поворот в производстве интегральных микросхем — переход от использования материалов на основе металлов к высокочистым сплавам. Использование чистых металлов в качестве проводникового материала приводит к ряду технологических отклонений. Микролегирование металла основы позволяет устранить эти недостатки. Особо чистый алюминий с минимальным содержанием примесей широко используется в электронной технике для изготовления токопроводящих дорожек интегральных микросхем. Поэтому разработка составов новых сплавов на основе этого металла является актуальной задачей. Одним из представителей данной группы сплавов на основе особо чистого алюминия является сплав АК1М2 (Al + 1 % Si + 2 % Cu). Последний сплав был принят в качестве модельного и подвергнут модифицированию щелочноземельными металлами (ЩЗМ).

В режиме «охлаждения» по известной теплоемкости эталонного образца из меди определена теплоемкость сплава АК1М2 с ЩЗМ. При этом получены полиномы, описывающие скорости охлаждения образцов из сплава АК1М2 с ЩЗМ и из эталона. По экспериментально найденным значениям скоростей охлаждения образцов из сплавов и эталона (с учетом их массы) установлены полиномы температурной зависимости теплоемкости сплавов. Температурная зависимость теплоемкости сплавов описывается четырехчленным уравнением. Используя интегральную зависимость удельной теплоемкости сплавов, построены модели температурной зависимости изменений их термодинамических функций.

С помощью полученных зависимостей установлено, что с ростом температуры теплоемкость и термодинамические функции сплавов увеличиваются. Добавки ЩЗМ незначительно уменьшают теплоемкость, энтальпию и энтропию исходного сплава АК1М2 и увеличивают значение энергии Гиббса. В пределах подгруппы ЩЗМ теплоемкость сплавов уменьшается, что коррелирует с теплоемкостью чистых ЩЗМ в пределах подгруппы.

Ключевые слова: алюминиевый сплав АК1М2, кальций, стронций, барий, теплоемкость, энтальпия, энтропия, энергия Гиббса

Введение

В последние годы наметился поворот в производстве интегральных микросхем, что заключается в переход от использования материалов на основе металлов, к высокочистым сплавам. Использование чистых металлов в качестве проводникового материала приводит к ряду технологических отклонений. Микролегирование металла основы позволяет устранить эти недостатки. Однако при подборе и использовании легирующих добавок появляются новые проблемы, которыми нельзя пренебрегать:

– выбор вида добавок и их оптимального состава;

– степень чистоты легирующих добавок, что на сегодняшний день является проблемой;

– необходимость надежной технологии и аппаратуры для синтеза высокочистых сплавов;

Ганиев Изатулло Наврузович^{1,§} — доктор хим. наук, профессор, академик АН РТ, профессор кафедры технологии химических производств, e-mail: ganiev48@mail.ru; **Отаджонов Сухроб Эргашалиевич**² — докторант PhD кафедры общей физики и твердого тела, e-mail: suhrob_22.10.91@mail.ru; **Махмудов Мухаммаджон**² — канд. хим. наук, доцент кафедры электроники; **Махмадизода Муродали Махмади**¹ — канд. техн. наук, доцент, декан факультета Инновационные технологии, e-mail: sangov72@mail.ru; **Абулхаев Владимир Джалолович**³ — доктор хим. наук, профессор, зам. директора, e-mail: abulkhaev-48@mail.ru

§ Автор для переписки

– отсутствие надежно разработанной теоретической основы для подбора необходимых композиций.

Изучение структуры и свойств алюминиевых сплавов, знание их природы позволяют изменить эксплуатационные характеристики приборов в лучшую сторону. Подобные сведения являются основой для широкого применения особо чистого (ос. ч.) алюминия в ряде других областей науки и техники. Сплавы на основе ос. ч. алюминия являются источником для широкого применения металлического алюминия особой степени чистоты в различных областях науки и техники. Поэтому научные разработки, связанные с применением новых сплавов на основе ос. ч. алюминия, являются своевременными и актуальными [1–3].

На сегодняшний день, к сожалению, в стороне от внимания исследователей остались вопросы разработки теоретических основ синтеза новых композиций сплавов. К их числу относится изучение различных свойств сплавов ос. ч. алюминия, в том числе исследование физико–химических свойств таких сплавов. В эту группу входят алюминиево–кремниевый сплав АК1 и сплав с медью АК1М2 (Al + 1 % Si + 2 % Cu) с участием щелочноземельных металлов (**ЩЗМ**) [4]. В связи с этим изучение теплоемкости и изменений термодинамических функций сплава марки АК1М2 с ЩЗМ от температуры и состава представляет научный и практический интерес.

Цель работы — экспериментальное определение зависимости удельной теплоемкости алюминиевого сплава АК1М2 от температуры с помощью эталона меди марки М00.

Методика эксперимента

Для измерения удельной теплоемкости сплавов и установления ее температурной зависимости широко используется закон охлаждения Ньютона–Рихмана. Изучая термограмму опреде-

ляемого образца, зная теплоемкость эталона можно определить теплоемкость неизвестного вещества. При этом эталон и исследуемый образец должны иметь одинаковую форму и охлаждаться от одной температуры.

Теплоемкость сплавов определяют по соотношению (1) для двух образцов одинакового размера при допущении, что $S_1 = S_2$ и $\alpha_1 = \alpha_2$:

$$C_{P_2}^0 = C_{P_1}^0 \frac{m_1}{m_2} \frac{\left(\frac{dT}{d\tau}\right)_1}{\left(\frac{dT}{d\tau}\right)_2}, \quad (1)$$

где $m_1 = \rho_1 V_1$ — масса первого образца; $m_2 = \rho_2 V_2$ — масса второго образца; $\left(\frac{dT}{d\tau}\right)_1, \left(\frac{dT}{d\tau}\right)_2$ — скорости охлаждения эталона и исследуемого образца; T — температура; τ — время охлаждения.

Одним из экспериментальных параметров, служащих для определения теплоемкости, является скорость охлаждения, которая определяется из термограммы образцов.

Подробно методика исследования теплоемкости твердых тел в режиме «охлаждение» приведена в работах [5–18]. Схема установки для измерения теплоемкости твердых тел представлено на рис. 1. Электропечь (3) смонтирована на стойке (6), она может перемещаться вверх и вниз. Образец (4) и эталон (5) тоже могут перемещаться. Они представляют собой цилиндр диаметром 16 мм и длиной 30 мм с высверленными каналами. С одного конца в канал вставляются термопары. К цифровым термометрам Digital Multimeter DI9208L (7, 8 и 9) подведены концы термопар. Электропечь запускается через лабораторный автотрансформатор (**ЛАТР**) (1). При этом нужная температура устанавливается с помощью терморегулятора (2). Начальная температура фиксируется по показаниям цифровых термометров. Образец и эталон вдвигают в электропечь и нагревают до нужной температуры. Контроль температуры

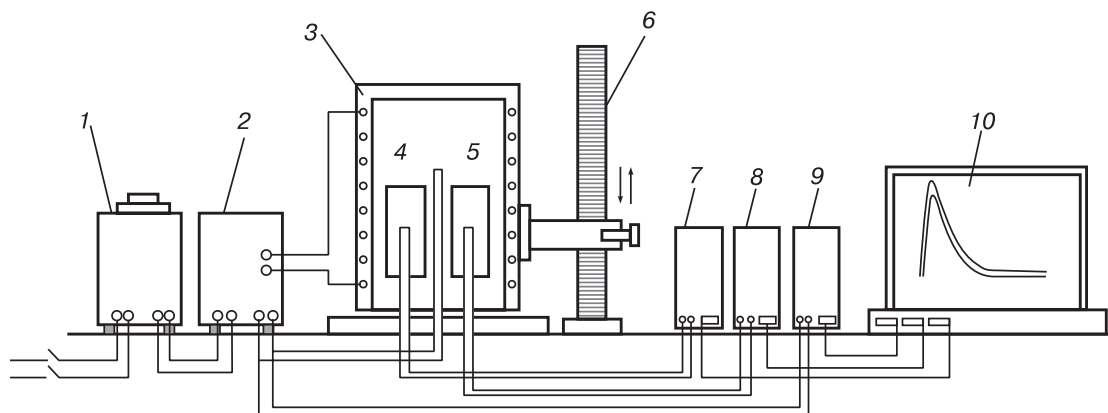


Рис. 1. Установка для определения теплоемкости твердых тел в режиме «охлаждения»

Fig. 1. Installation for determining the heat capacity of solids in the «cooling» mode

при этом осуществляется по показаниям цифровых термометров на компьютере (10). Из электропечи одновременно выдвигают образец и эталон, и с этого момента фиксируют температуру. Показания цифрового термометра записывают на компьютер через

каждые 10 с. Процесс охлаждения образца и эталона проводят до температуры 35 °С.

Результаты и их обсуждение

Кривые охлаждения образцов из сплава АК1М2 с ЦЗМ, полученные экспериментально, представлены на рис. 2. Интервал фиксации температуры составлял 10 с. В интервале от 40 до 400 °С относительная ошибка измерения температуры составляла $\pm 1\%$, а в интервале более 400 °С — $\pm 2,5\%$. Погрешность измерения теплоемкости по предлагаемой методике не превышает 4 %.

Термограммы сплавов (см. рис. 2) можно описать уравнением вида

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

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

Дифференцируя уравнение (2) по τ , получаем уравнение для определения скорости охлаждения 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 сплавов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения коэффициентов a, b, p, k, ab, pk в уравнении (3) для сплава АК1М2 с ЦЗМ [The values of the coefficients a, b, p, k, ab, pk in equations (3) for the alloy АК1М2 with alkaline earth metals]

Содержание ЦЗМ в сплаве АК1М2, % (мас.)	a, K	$b \cdot 10^{-3}, c^{-1}$	p, K	$k \cdot 10^{-5}, c^{-1}$	$ab, K/c$	$pk, K/c$
0	569,65	5,74	317,71	3,29	3,27	0,011
1,0 (Ca)	544,94	5,56	320,93	3,99	3,03	0,013
1,0 (Sr)	569,75	5,73	311,07	3,31	3,26	0,010
1,0 (Ba)	567,66	5,76	310,04	1,68	3,27	0,0053
Эталон (Cu марки М00)	481,72	6,49	329,53	8,17	3,13	0,027

Таблица 2

Значения коэффициентов a, b, c, d в уравнении (4) для сплава АК1М2 с ЦЗМ и эталона [The values of the coefficients a, b, c, d for АК1М2 alloy with alkaline earth metals and standard]

Содержание ЦЗМ в сплаве АК1М2, % (мас.)	$a, Дж/(кг \cdot K)$	$b, Дж/(кг \cdot K)^2$	$c, Дж/(кг \cdot K)^3$	$d, Дж/(кг \cdot K)^4$	Коэффициент регрессии R
0	293,75	2,84	2,88	1,25	0,9991
1,0 (Ca)	82,80	3,39	2,71	0,83	0,9989
1,0 (Sr)	322,31	2,61	2,59	1,12	0,9995
1,0 (Ba)	418,09	1,84	1,58	6,29	0,9998
Эталон (Cu марки М00)	324,454	0,2751	0,28	0,142	1,00

Таблица 3

Изменение удельной теплоемкости (Дж/(кг · К)) сплава АК1М2 с ЩЗМ в зависимости от температуры [Specific heat capacity (J/(kg · K)) of AK1M2 alloy with alkaline earth metals on temperature]

Содержание ЩЗМ в сплаве АК1М2, % (мас.)	Температура, К						Рост C_p^0 , %
	300	400	500	600	700	800	
0	919,9	1048,5	1149,4	1230,3	1298,6	1361,8	32,5
1,0 (Ca)	877,6	1057,3	1202,6	1318,7	1410,4	1482,7	40,8
1,0 (Sr)	902,4	1023,4	1119,4	1197,2	1263,3	1324,5	31,8
1,0 (Ba)	844,9	941,6	1021,9	1089,4	1148,0	1201,4	29,6
Эталон (Cu марки М00)	384,99	397,66	408,00	416,87	425,10	433,56	11,2

Получен следующий полином, который описывает температурную зависимость удельной теплоемкости сплава АК1М2 с ЩЗМ:

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

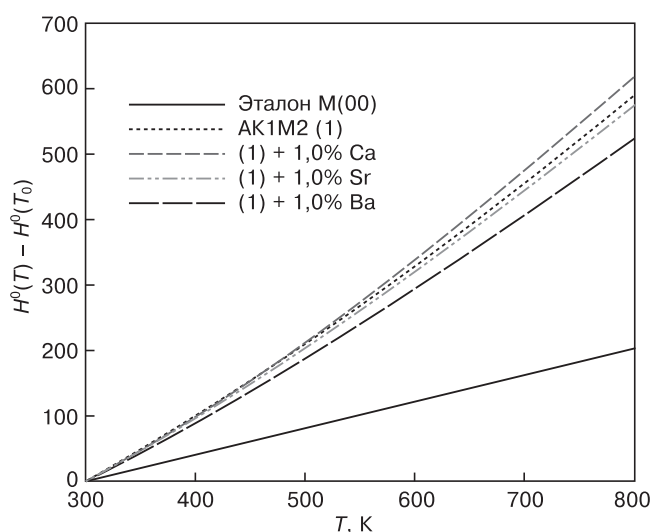


Рис. 3. Температурные зависимости изменения энthalпии для сплава АК1М2 с ЩЗМ и эталона (Cu марки М00)

Fig. 3. Temperature dependence of changes in enthalpy for AK1M2 alloy with alkaline earth metals and standard (Cu grade M00)

Значения коэффициентов уравнения (4) представлены в табл. 2.

Обработку результатов проводили с помощью программы MS Excel. Графики строили с помощью программы Sigma Plot. Коэффициент корреляции составил не менее 0,998. Удельную теплоемкость

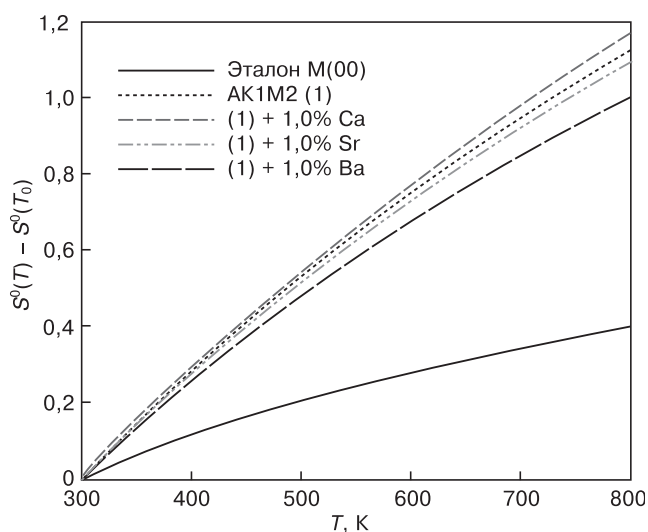


Рис. 4. Температурные зависимости изменения энтропии для сплава АК1М2 с ЩЗМ и эталона (Cu марки М00)

Fig. 4. The temperature dependence of the changes in entropy for the AK1M2 alloy with alkaline earth metals and standard (Cu grade M00)

Таблица 4

Температурная зависимость изменений энергии Гиббса для сплава АК1М2 с ЩЗМ и эталона (Cu марки М00) [Temperature dependence of Gibbs energy changes for AK1M2 Alloy with alkaline earth metals and standard (Cu of M00 mark)]

Содержание ЩЗМ в сплаве АК1М2, % (мас.)	Температура, К					
	300	400	500	600	700	800
0	-0,005	-15,1	-56,5	-120,9	-205,9	-309,5
1,0 (Ca)	-0,005	-14,7	-55,8	-121,0	-208,3	-315,6
1,0 (Sr)	-0,005	-14,8	-55,2	-118,1	-201,1	-302,1
1,0 (Ba)	-0,005	-13,8	-51,1	-109,1	-185,2	-277,7
Эталон (Cu марки М00)	-0,002	-6,11	-22,24	-46,58	-77,90	-115,31

сплава АК1М2 с ЦЗМ рассчитывали по уравнению (1), используя значения скорости охлаждения образцов и эталона. При этом использовали программу Sigma Plot. Результаты расчета удельной теплоемкости сплавов по формулам (1) и (4) для различных значений температуры (с шагом 100 К) представлены в табл. 3.

С ростом температуры теплоемкость сплавов увеличивается независимо от содержания добавки ЦЗМ. Добавки ЦЗМ к сплаву АК1М2 уменьшают его теплоемкость. Теплоемкость сплава АК1М2, легированного ЦЗМ при переходе от сплавов с кальцием к сплавам с барием уменьшается. Это коррелируется с изменением теплоемкости чистых ЦЗМ в пределах подгруппы (Са — 670,4 Дж/(кг·К); Sr — 313,6 Дж/(кг·К) и Ва — 258,7 Дж/(кг·К)) при 400 К [19].

Температурные зависимости изменений энтальпии, энтропии и энергии Гиббса для сплавов рассчитывали по уравнениям (5)—(7). При этом были использованы интегралы от удельной теплоемкости (см. уравнение (4)):

$$\begin{aligned} [H^0(T) - H^0(T_0)] &= a(T - T_0) + \\ &+ \frac{b}{2}(T^2 - T_0^2) + \frac{c}{3}(T^3 - T_0^3) + \frac{d}{4}(T^4 - T_0^4), \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} [S^0(T) - S^0(T_0)] &= a \ln \frac{T}{T_0} + b(T - T_0) + \\ &+ \frac{c}{2}(T^2 - T_0^2) + \frac{d}{3}(T^3 - T_0^3), \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} [G^0(T) - G^0(T_0)] &= \\ &= [H^0(T) - H^0(T_0)] - T[S^0(T) - S^0(T_0)], \end{aligned} \quad (7)$$

где $T_0 = 298,15$ К.

Результаты расчета температурных зависимостей изменения энтальпии (кДж/кг) и энтропии (кДж/(кг·К)) для сплава АК1М2 с ЦЗМ представлены на рис. 3 и 4. В табл. 4 приведена температурная зависимость изменений энергии Гиббса для сплава АК1М2 с ЦЗМ.

Все изменения термодинамических функций и теплоемкости сплава АК1М2 с ЦЗМ объясняются ростом степени гетерогенности структуры сплавов, что связано с модифицированием их структуры при микролегировании ЦЗМ [20, 21].

Заключение

В режиме «охлаждения» с учетом известной теплоемкости эталонного образца из меди установлено влияние ЦЗМ (Са, Sr, Ва) на температурные зависимости теплоемкости и изменений термодинамических функций сплава АК1М2. Отмечено, что рост теплоемкости, энтальпии и энтропии сплавов

с повышением температуры не зависит от концентрации ЦЗМ в сплаве АК1М2. При этом значение энергии Гиббса уменьшается. Легирование сплава АК1М2 до 1,0 % (мас.) ЦЗМ увеличивает теплоемкость, энтальпию, энтропию и уменьшает значение энергии Гиббса. Выявлено уменьшение значения теплоемкости при переходе от сплавов с кальцием к сплавам с барием. Это коррелирует с теплоемкостью чистых ЦЗМ в пределах подгруппы. Аналогичным образом изменяются термодинамические функции сплава АК1М2 в пределах подгруппы ЦЗМ.

Библиографический список

1. Белецкий В. М., Кривов Г. А. *Алюминиевые сплавы (Состав, свойства, технология, применение): справочник* / Под ред. И. Н. Фридляндера. К.: КОМИТЕХ, 2005. 365 с.
2. Мондольфо Л. Ф. *Структура и свойства алюминиевых сплавов*. М.: Металлургия, 1979. 639 с.
3. Луц А. Р., Суслина А. А. *Алюминий и его сплавы*. Самара: Самарск. гос. техн. ун-т. 2013. 81 с.
4. Ниезов Х. Х., Ганиев И. Н., Бердиев А. Э. *Сплавы особого чистого алюминия с редкоземельными металлами: монография*. Душанбе: ООО «Сармад компания», 2017. 146 с.
5. Азимов Х. Х., Ганиев И. Н., Амонов И. Т., Иброхимов Н. Ф. Влияние лития на теплоемкость и изменение термодинамических функций алюминиевого сплава АЖ2.18 // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2018. Т. 16. № 1. С. 37—44. DOI: 10.18503/1995-2732-2018-16-1-37-44
6. Иброхимов Н. Ф., Ганиев И. Н., Ганиева Н. И. Влияние иттрия на теплофизические свойства сплава АМг2 // *Научный вестник НГТУ*. 2017. № 2. С. 177—187. DOI: 10.17212/1814-1196-2017-2-177-187
7. Зокиров Ф. Ш., Ганиев И. Н., Бердиев А. Э., Иброхимов Н. Ф. Температурная зависимость теплоемкости и термодинамических функций сплава АК12М2, модифицированного стронцием // *Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета)*. 2017. № 41 (67). С. 22—26.
8. Ганиев И. Н., Ниезов Х. Х., Гулов Б. Н., Низомов З., Бердиев А. Э. Температурная зависимость теплоемкости и термодинамических функций сплава АК1М2, легированного празеодимом и неодимом // *Вестник Сибирского государственного промышленного университета*. 2017. № 3 (21). С. 32—39.
9. Ганиев И. Н., Муллоева Н. М., Эшов Б. Б., Аминбекова М. С. Температурная зависимость теплоемкости и изменение термодинамических функций сплавов системы Pb—Ba // *Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1: Естественные и технические науки*. 2018. № 2. С. 69—75.
10. 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. DOI: 10.7868/S001532301601006X
11. Гулов С. С., Ганиев И. Н., Сафаров М. М., Ганиева Н. И. Влияние добавок германия и олова на теплопроводность сплава АК7М2 в зависимости от температуры // *Доклады АН Республики Таджикистан*. 2016. Т. 59, № 3—4. С. 142—145.
12. Ганиев И. Н., Сафаров А. Г., Одинаев Ф. Р., Якубов У. Ш., Кабутов К. Температурная зависимость теплоемкости и изменение термодинамических функций сплава АЖ4.5 с оловом // *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2019. № 1. С. 50—58. DOI: 10.17073/0021-3438-2019-1-50-58
13. Ганиев И. Н., Якубов У. Ш., Сангов М. М., Сафаров А. Г. Влияния кальция на температурную зависимость удельной теплоемкости и изменений термодинамических функций алюминиевого сплава АЖ5К10 // *Вестник Казанского технологического университета*. 2018. Т. 21, № 8. С. 11—15.
14. Ганиев И. Н., Муллоева Н. М., Низомов З. А., Махмадulloев Х. А. Теплофизические свойства и термодинамические функции сплавов системы Pb—Sr // *Известия Самарского научно-технологического центра РАН*. 2014. Т. 16, № 6. С. 38—42. URL: http://www.ssc.smr.ru/media/journals/izvestia/2014/2014_6_38_42.pdf

15. Ганиев И. Н., Алиев Д. Н., Иброхимов Н. Ф., Алиханова С. Д., Одинаева Н. Б. Температурная зависимость термодинамических функций сплавов Zn5Al и Zn55Al // Доклады АН Республики Таджикистан. 2014. Т. 57, № 7. С. 588—593.

16. Зокиров Ф. Ш., Ганиев И. Н., Ибрахимов Н. Ф., Бердиев А. Э. Температурная зависимость теплоемкости и коэффициента теплоотдачи сплава АК12М2 // Вестник технологического университета Таджикистана. 2014. № 1 (22). С. 22—24.

17. Якубов У. Ш., Ганиев И. Н., Махмадизода М. М., Сафаров А. Г., Ганиева Н. И. Влияние стронция на температурную зависимость удельной теплоемкости и изменений термодинамических функций сплава АЖ5К10 // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1: Естественные и технические науки. 2018. № 3. С. 61—67.

18. 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. URL: http://www.ssc.smr.ru/media/journals/izvestia/2018/2018_1_23_29.pdf

19. Зиновьев В. Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах. М.: Металлургия, 1984. 384 с.

20. Ганиев И. Н., Вахобов А. В. Стронций — эффективный модификатор силуминов // Литейное производство. 2000. № 5. С. 28—29.

21. Каргаполова Т. Б., Ганиев И. Н., Махмадуллоев Х. А., Хакдодов М. М. Барий — новый модификатор силуминов // Литейное производство. 2001. № 10. С. 9—10.

Статья поступила в редакцию 29 июня 2020 г.

Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronics Engineering. 2020, vol. 23, no. 3, pp. 222—228.
DOI: 10.17073/1609-3577-2020-3-222-228

Effect of alkaline earth metals on the heat capacity and change of thermodynamic function of AK1M2 alloy on the basis of specific aluminum

I. N. Ganiev^{1,*}, C. E. Otajonov², M. Makhmudov², M. M. Mahmadizida¹, V. D. Abulkhaev³

¹ *Tajik Technical University named after academician M. S. Osimi,
10 Radjabovs Str., Dushanbe 734042, Tajikistan*

² *Khujand State University named after academician B. Gafurov,
1 Mavlonbekova Proezd, Khujand, 735700, Tajikistan*

³ *Institute of Chemistry named after V. I. Nikitina, Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan,
299/2 Sadridin Ayni Str., Dushanbe 734063, Tajikistan*

Abstract. It is known that high purity aluminum with a minimum content of impurities is widely used in electronic technology for the manufacture of conductive paths in integrated circuits. Hence the development of new compositions of alloys based on such a metal is a very urgent task. One of the promising alloys based on such a metal is alloy AK1M2 (Al + 1 % Si + 2 % Cu). This alloy was accepted by us as a model alloy and subjected to modification by alkaline earth metals.

Heat capacity is the most important characteristic of substances and by its variation with temperature one can determine the type of phase transformation, the Debye temperature, the energy of formation of vacancies, the coefficient of electronic heat capacity, and other properties. In the present work, the heat capacity of the AK1M2 alloy with alkaline earth metals was determined in the “cooling” mode from the known heat capacity of a reference sample from copper. For which, by processing the curves of the cooling rate of samples from the alloy AK1M2 with alkaline earth metals and the standard, polynomials were obtained which describe their cooling rates. Further, by experimentally found values of the cooling rates of the standard and samples from alloys, knowing their masses, the 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 the integrals of the specific heat, the models of temperature dependence of the change in enthalpy, entropy and Gibbs energy were established.

The dependences obtained show that with an increase in temperature, the heat capacity, enthalpy, and entropy of alloys increase, and the values of Gibbs energy decrease. At the same time, additives of alkaline earth metals do not significantly reduce the heat capacity, enthalpy and entropy of the original alloy AK1M2 and increase the value of Gibbs energy. During the transition from alloys with calcium with barium, the heat capacity of the alloys decreases, which correlates with the heat capacity of pure alkaline earth metals within the subgroup.

Keywords: alloy AK1M2, calcium, strontium, barium, heat capacity, enthalpy, entropy, Gibbs energy

References

1. Beleskiy V. M., Krivov G. A. *Alyuminievye splavy* (Sostav, svoystva, tekhnologiya, primeneniye) [Aluminum alloys (Composition, properties, technology, application)]. Kiev: KOMITEKh, 2005, 365 p. (In Russ.)

2. Mondolfo L. F. *Aluminum alloys: structure and properties*. Oxford (UK): Butterworth-Heinemann, 1976, 982 p.

3. Luts A. R., Suslina A. A. *Alyuminii i ego splavy* [Aluminum and its alloys]. Samara: Samara State Technical University, 2013, 81 p. (In Russ.)

4. Niezov Kh. Kh., Ganiev I. N., Berdiev A. E. *Splavy osobochistogo alyuminiya s redkozemel'nyimi metallami* [Alloys high purity aluminium with rare-earth metals]. Dushanbe: Sarmad kompaniya, 2017, 146 p. (In Russ.)

Information about authors:

Izatullo N. Ganiev^{1,*}: Dr. Sci. (Chem.), Professor, Academician Academy Science of the Republic of Tajikistan, Professor of the Department “Technology of Chemical Production” (ganiev48@mail.ru); **Suhrob E. Otajonov²:** Doctoral Student PhD Department of General Physics and Solid Bodies (suhrob_22.10.91@mail.ru); **Muhamadjon Mahmudov²:** Cand. Sci. (Chem.), Associate Professor; **Mahmadali M. Mahmadizida¹:** Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Dean of the Faculty of Innovative Technologies (sangov72@mail.ru); **Vladimir D. Abulkhaev³:** Dr. Sci. (Chem.), Professor, Deputy Director (abulkhaev-48@mail.ru)

* Corresponding author

5. Azimov Kh. Kh., Ganiev I. N., Amonov I. T., Ibrohimov N. F. Effect produced by lithium on the heat capacity and the changing thermodynamic functions of the AZh2.18 aluminium alloy. *Vestnik of Novosibirsk State Technical University*, 2018, vol. 16, no. 1, pp. 37—44. (In Russ.). DOI: 10.18503/1995-2732-2018-16-1-37-44
6. Ibrokhimov N. F., Ganiev I. N., Ganieva N. I. Yttrium effects on thermophysical properties of AMg2 alloys. *Science Bulletin of the NSTU*, 2017, no. 2, pp. 177—187. (In Russ.). DOI: 10.17212/1814-1196-2017-2-177-187
7. Zokirov F. Sh., Ganiev I. N., Berdiyev A. E., Ibrohimov N. F. Temperature dependence of heat capacity and thermodynamic function of alloy AK12M2 modified by strontium. *Bulletin of the St. Petersburg State Technological Institute (Technical University)*, 2017, no. 41, pp. 22—26. (In Russ.)
8. Ganiev I. N., Niyozov Kh. H., Gulov B. N., Nizomov Z., Berdiyev A. E. Temperature dependence of the heat capacity and thermodynamic functions of the AKLM2 alloy doped with praseodymium and neodymium. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*, 2017, no. 3, pp. 32—39. (In Russ.)
9. Ganiev I. N., Mulloyeva N. M., Eshov B. B., Aminbekova M. S. Temperature dependence of heat capacity and change thermodynamic functions of alloys of the system Pb—Ba. *Vestnik of St. Petersburg State University of Technology and Design. Series 1. Natural and Technical Sciences*, 2018, no. 2, pp. 69—75. (In Russ.)
10. Ibrokhimov N. F., Ganiev I. N., Nizomov Z., Ganieva N. I., Ibrokhimov S. Zh. Effect of cerium on the thermophysical properties of AMg2 alloy. *The Physics of Metals and Metallography*, 2016, vol. 117, no. 1, pp. 49—53. DOI: 10.1134/S0031918X16010063
11. Gulov S. S., Ganiev I. N., Safarov M. M., Ganieva N. I. Effect of germanium and tin alloy AK7M2 on the thermal conductivity depending on temperature. *Doklady AN Respubliki Tadjikistan = Reports of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan*, 2016, vol. 59, no. 3—4, pp. 142—145. (In Russ.)
12. Ganiev I. N., Safarov A. G., Odinaev F. R., Yakubov U. S., Kabutov K. Temperature dependence of specific heat and thermodynamic functions of Al + 4,5 % Fe alloys doped with tin. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya = Universities' Proceedings Non-Ferrous Metallurgy*, 2019, no. 1, pp. 50—58. (In Russ.). DOI: 10.17073/0021-3438-2019-1-50-58
13. Ganiev I. N., Yakubov U. Sh., Sangov M. M., Safarov A. G. Calcium influence upon the temperature dependence of specific heat capacity and on changes in the thermodynamic functions of aluminum alloy AlFe5S10. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta = Bulletin of the Technological University*, 2018, vol. 21, no. 8, pp. 11—15. (In Russ.)
14. Ganiev I. N., Mulloyeva N. M., Nizomov Z. A., Makhmadulloev H. A. Heatphysical properties and thermodynamic functions alloys of Pb—Sr system. *Izvestiya Samarskogo nauchno tsentra Rossiiskoi Akademii nauk = Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2014, vol. 16, no. 6, pp. 38—42. (In Russ.). URL: http://www.ssc.smr.ru/media/journals/izvestia/2014/2014_6_38_42.pdf
15. Ganiev I. N., Aliev J. N., Ibrohimov N. F., Alihanova S. J., Odinaeva N. B. Temperature dependence thermodynamic functions alloys Zn5Al and Zn55Al. *Doklady AN Respubliki Tadjikistan = Reports of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan*, 2014, vol. 57, no. 7, pp. 588—593. (In Russ.)
16. Zokirov F. Sh., Ganiev I. N., Ibrohimov N. F., Berdiyev A. E. The temperature dependence of the heat capacity and the heat transfer coefficient of the alloy AK12M2. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta Tadjikistana*, 2014, no. 1, pp. 22—24. (In Russ.)
17. Yakubov U. Sh., Ganiev I. N., Makhmadizoda M. M., Safarov A. G., Ganieva N. I. Influence of calcium on temperature dependence specific heat capacity and change thermodynamic functions of aluminum alloy Al5Fe10Si. *Vestnik of St. Petersburg State University of Technology and Design. Series 1. Natural and Technical Sciences*, 2018, no. 3, pp. 61—67. (In Russ.)
18. Umarov M., Ganiev I. Temperature dependence of the heat capacity and change of thermodynamic functions lead grade C2. *Izvestiya Samarskogo nauchno tsentra Rossiiskoi Akademii nauk = Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2018, vol. 20, no. 1, pp. 23—29. (In Russ.). URL: http://www.ssc.smr.ru/media/journals/izvestia/2018/2018_1_23_29.pdf
19. Zinovev V. E. *Teplofizicheskie svoystva metallov pri vysokikh temperaturakh* [Thermophysical properties of metals at high temperatures]. Moscow: Metallurgiya, 1984, 384 p. (In Russ.)
20. Ganiev I. N., Vahobov A. V. Strontium — the effective modifier of silumin. *Liteinoe proizvodstvo = Foundry. Technologies and Equipment*, 2000, no. 5, pp. 28—29. (In Russ.)
21. Kargapolova T. B., Makhmadulloev H. A., Ganiev I. N., Khakdodov M. M. Barium: a new inoculant for silumins. *Liteinoe proizvodstvo = Foundry. Technologies and Equipment*, 2001, no. 10, pp. 9—10. (In Russ.)

Received June 29, 2020