

УДК 620.193+669.715

## Влияние добавок висмута на теплофизические и термодинамические свойства алюминиевого полупроводникового сплава E–AlMgSi (алдрей)

© 2020 г. И. Н. Ганиев<sup>1</sup>, А. П. Абулаков<sup>2</sup>, Дж. Х. Джайлоев<sup>3</sup>,  
У. Ш. Якубов<sup>3</sup>, А. Г. Сафаров<sup>3</sup>, В. Д. Абулхаев<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup> *Дангаринский государственный университет,  
ул. Маркази, д. 25, Дангара, 735320, Таджикистан*

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

**Аннотация.** Экономическая целесообразность применения алюминия в качестве проводникового материала объясняется благоприятным соотношением его стоимости и стоимости меди. Немаловажным является и то, что стоимость алюминия в течение многих лет практически не меняется.

При использовании проводниковых алюминиевых сплавов для изготовления тонкой проволоки, обмоточного провода и т. д. 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 использовать их в качестве проводникового материала.

Одним из перспективных направлений использования алюминия является электротехническая промышленность. Проводниковые алюминиевые сплавы типа E–AlMgSi (алдрей) являются представителями данной группы сплавов. В работе представлены результаты исследования температурной зависимости теплоемкости, коэффициента теплоотдачи и термодинамических функций алюминиевого сплава E–AlMgSi (алдрей) с висмутом. Исследования проведены в режиме «охлаждения».

Показано, что с ростом температуры теплоемкость и термодинамические функции сплава E–AlMgSi (алдрей) с висмутом увеличиваются, а значение энергии Гиббса уменьшается. Добавки висмута до 1 % (мас.) уменьшают теплоемкость, коэффициент теплоотдачи, энтальпию и энтропию исходного сплава и увеличивают энергию Гиббса.

**Ключевые слова:** алюминиевый сплав E–AlMgSi (алдрей), висмут, теплоемкость, коэффициент теплоотдачи, режим «охлаждения», энтальпия, энтропия, энергия Гиббса

### Введение

Алюминий и его сплавы широко применяют в электротехнике в качестве проводника и конструкционного материала. Как проводниковый материал алюминий характеризуется высокой электро- и теплопроводностью (после меди максимальный уровень среди всех технически применяемых металлов) [1].

Алюминий также отличается малой плотностью, высокой коррозионной стойкостью в атмосферных условиях и стойкостью против воздействия химических веществ. Несмотря на это, сплавы алюминия в определенном состоянии и в жестких условиях эксплуатации могут подвергаться опасным видам коррозионных разрушений. Особый интерес представляет коррозия алюминия в растворах, близких к нейтральным средам ( $6 < \text{pH} < 8$ ).

**Ганиев Изатулло Наврузович**<sup>1</sup> — академик АН Республики Таджикистан, доктор хим. наук, профессор кафедры «Технология химических производств», e-mail: ganiev48@mail.ru; **Абулаков Аслам Пирович**<sup>2</sup> — ассистент кафедры «Сельского строительства, гидротехника и геологии»; **Джайлоев Джамшед Хусейнович**<sup>3</sup> — старший научный сотрудник, e-mail: husenzod85@mail.ru; **Якубов Умарали Шералиевич**<sup>3</sup> — старший научный сотрудник, e-mail: yakubovumarali@gmail.com; **Сафаров Амиршо Гоибович**<sup>3</sup> — старший научный сотрудник, e-mail: amirsho71@mail.ru; **Абулхаев Владимир Джалолович**<sup>3</sup> — доктор хим. наук, профессор, зам. директора, e-mail: abulkhaev-48@mail.ru

§ Автор для переписки

К такому виду коррозии относится коррозия в природных средах: морская, озерная и речная вода, питьевая вода и атмосферные осадки. В этих условиях при обычных температурах скорость ионов  $H^+$  или молекул  $H_2O$  с выделением водорода пренебрежимо мала [2].

Экономическая целесообразность применения алюминия в качестве проводникового материала объясняется благоприятным соотношением его стоимости со стоимостью меди. Кроме того, следует учесть и тот фактор, что стоимость алюминия в течение многих лет практически не меняется [3, 4].

При использовании проводниковых алюминиевых сплавов для изготовления тонкой проволоки, например обмоточного провода и т. д., могут возникнуть определенные сложности в связи с недостаточной прочностью и малым числом перегибов до разрушения таких проводов.

В последние годы разработаны алюминиевые сплавы, которые даже в мягком состоянии обладают прочностными характеристиками, позволяющими использовать их в качестве проводникового материала [4].

Одним из проводниковых алюминиевых сплавов является сплав  $E-AlMgSi$  (алдрей), который относится к термоупрочняемым сплавам. Он отличается высокой прочностью и хорошей пластичностью. Данный сплав при соответствующей термической обработке приобретает высокую электропроводность. Изготовленные из него провода используются почти исключительно для воздушных линий электропередач [4—6].

В связи с тем, что линии электропередачи из алюминия и его сплавов эксплуатируются в открытой атмосфере, вопросы повышения коррозионной стойкости сплавов являются актуальными.

Целью работы — исследование влияния добавок висмута на теплофизические свойства и термодинамические функций алюминиевого проводникового сплава  $E-AlMgSi$  (алдрей), химического состава, % (мас.):  $Mg$  — 0,5;  $Si$  — 0,5;  $Al$  — остальное.

## Образцы и методы исследования

Синтез сплавов проводили в шахтной лабораторной печи сопротивления типа СШОЛ при температуре 750—800 °С. В качестве шихты при получении сплава  $E-AlMgSi$  использовали алюминий марки А6, который дополнительно легировали расчетным количеством кремния и магния. При легировании алюминия кремнием учитывали имеющийся в составе первичного алюминия металлический кремний (0,1 % (мас.)). Магний, завернутый в алюминиевую фольгу, вводили в расплав алюминия с помощью колокольчика. Висмут вводили в расплав в завернутом в алюминиевой фольге виде. Химический анализ полученных сплавов на содержание кремния и магния проводили в Центральной заводской лаборатории ГУП «Таджикская алюминиевая компания». Состав сплавов также контролировали взвешиванием шихты и полученных сплавов. При отклонении веса сплавов более чем на 1—2 % (отн.) синтез сплавов проводили заново. Далее из расплава удаляли шлак и проводили литье образцов в графитовую изложницу для исследования теплофизических свойств. Образцы цилиндрической формы имели диаметр 16 мм и длину 30 мм.

Теплоемкость сплавов измеряли на установке, схема которой представлено на рис. 1. 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 термопары. Концы термопар подведены к цифровому термометру Digital Multimeter DI9208L (7, 8 и 9). Электропечь запускается через лабораторный автотрансформатор 1, путем установки нужной температуры с помощью терморегулятора 2. По показаниям цифровых термометров Digital Multimeter DI9208L фиксируется значение начальной температуры. Образец и эталон помещают в электропечь

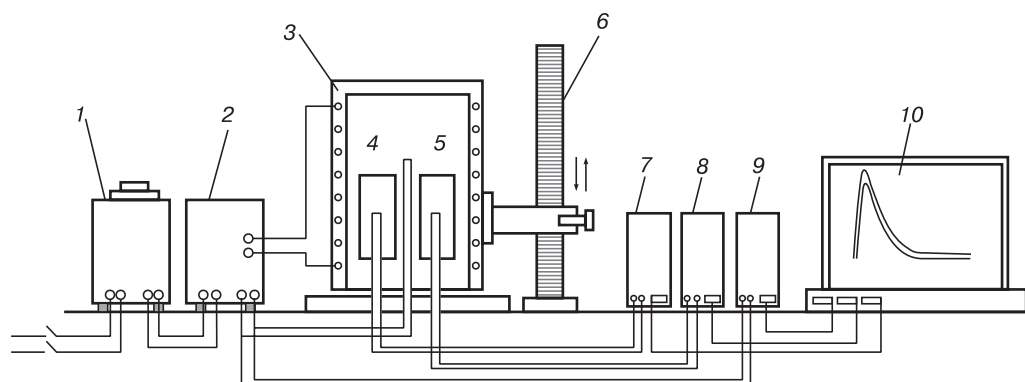


Рис. 1. Схема установки для определения теплоемкости твердых тел в режиме «охлаждения»

Fig. 1. Installation diagram for determining the heat capacity of solids in the “cooling” mode

и нагревают до нужной температуры, контролируя температуру по показаниям цифровых термометров Digital Multimeter DI9208L на компьютере 10. Образец и эталон одновременно выдвигают из электропечи и с этого момента фиксируют температуру. Показания цифрового термометра Digital Multimeter DI9208L записывают на компьютер через каждые 10 с, охлаждая образец и эталон до комнатной температуры (30 °С).

Для измерения температуры использовали многоканальный цифровой термометр, который позволял прямо фиксировать результаты измерений на компьютере в виде таблиц. Точность измерения температуры составляла 0,1 °С. Относительная ошибка измерения температуры в интервале от 40 до 400 °С составляла  $\pm 1\%$ . Погрешность измерения теплоемкости по предлагаемой методике не превышает 4—6 % в зависимости от температуры.

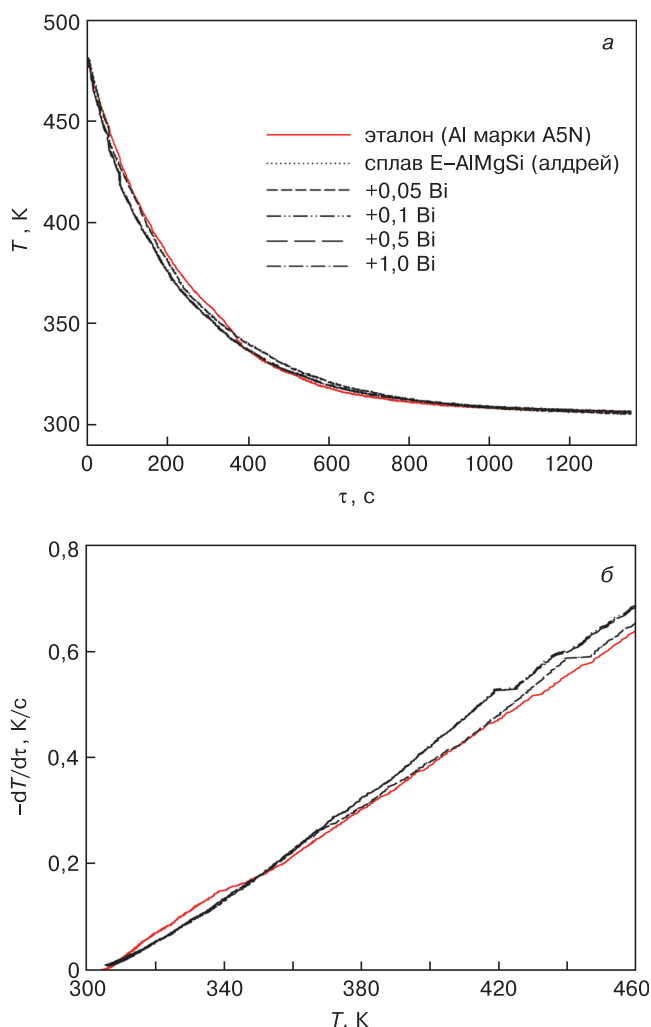


Рис. 2. Зависимости температуры от времени (а) и скорости охлаждения от температуры (б) для образцов из сплава E-AlMgSi (алдрей) с различным содержанием висмута и эталона (Al марки A5N)

Fig. 2. Dependence of temperature (a) and cooling rate (б) for samples from an E-AlMgSi alloy (Aldrey) with bismuth and a reference (A5N grade Al) on time

Обработку результатов измерений проводили с помощью программы MS Excel. Графики строили с помощью программы Sigma Plot. Коэффициент корреляции составлял величину  $R_{\text{корр.}} > 0,989$ , что подтверждает правильность выбора аппроксимирующей функции.

### Результаты и их обсуждение

Для определения скорости охлаждения строили кривые охлаждения образцов. Кривые охлаждения представляют собой зависимость температуры образца от времени при охлаждении его на воздухе [7—15].

Экспериментально полученные временные зависимости температуры образцов (рис. 2, а) описываются уравнением вида

$$T = ae^{-b\tau} + pe^{-k\tau}, \quad (1)$$

где  $a, b, p, k$  — константы;  $\tau$  — время охлаждения.

Дифференцируя уравнение (1) по  $\tau$ , получили уравнение для определения скорости охлаждения образцов:

$$\frac{dT}{d\tau} = -abe^{-b\tau} + pke^{-k\tau}, \quad (2)$$

По уравнению (2) были вычислены скорости охлаждения образцов из сплава E-AlMgSi (алдрей), легированного висмутом, которые приставлены на рис. 2. б. Значения коэффициентов  $a, b, p, k, ab, pk$  в уравнении (2) для исследованных сплавов приведены в табл. 1.

Далее по рассчитанным значениям скорости охлаждения образцов сплавов и эталона (Al марки A5N) была вычислена удельная теплоемкость сплава E-AlMgSi (алдрей), легированного висмутом:

$$C_{P_2}^0 = C_{P_1}^0 \frac{m_1}{m_2} \frac{\left(\frac{dT}{d\tau}\right)_1}{\left(\frac{dT}{d\tau}\right)_2}, \quad (3)$$

где  $m_1 = \rho_1 V_1$  — масса эталона;  $m_2 = \rho_2 V_2$  — масса исследуемого образца;  $\left(\frac{dT}{d\tau}\right)_1, \left(\frac{dT}{d\tau}\right)_2$  — скорости охлаждения образцов из эталона и сплавов при данной температуре.

С помощью полиномиальной регрессии было получено уравнение для температурной зависимости удельной теплоемкости сплава E-AlMgSi (алдрей), легированного висмутом:

$$C_{P_0}^0 = a + bT + cT^2 + dT^3. \quad (4)$$

Коэффициенты  $a, b, c, d$  в уравнении (4) приведены в табл. 2.

Таблица 1

**Значения коэффициентов  $a, b, p, k, ab, pk$  в уравнении (2) для сплава E–AlMgSi (алдрей), легированного висмутом [The values of the coefficients  $a, b, p, k, ab, pk$  in equation (2) for the E–AlMgSi alloy (Aldrey) doped with bismuth]**

Содержание висмута в сплаве E–AlMgSi, % (мас.)	$a, K$	$b \cdot 10^{-3}, c^{-1}$	$p, K$	$k \cdot 10^{-5}, c^{-1}$	$ab \cdot 10^{-1}, K \cdot c^{-1}$	$pk \cdot 10^{-3}, K \cdot c^{-1}$
Сплав E–AlMgSi	165,61	4,46	314,72	2,27	7,38	7,14
+0,05 Bi	164,02	4,46	314,82	2,31	7,32	7,26
+0,1 Bi	160,75	4,74	315,21	2,11	7,61	6,64
+0,5 Bi	158,44	4,72	314,99	2,06	7,48	6,48
+1,0 Bi	159,23	4,73	315,17	2,10	7,54	6,62
Эталон (Al марки A5N)	494,26	5,01	319,92	2,57	0,25	8,23

Таблица 2

**Значения коэффициентов  $a, b, c, d$  в уравнении (4) для образцов из сплава E–AlMgSi (алдрей), легированного висмутом, и эталона (Al марки A5N) [The values of the coefficients  $a, b, c, d$  in equation (4) for samples of E–AlMgSi alloy (Aldrey) doped with bismuth and a reference (A5N grade Al)]**

Содержание висмута в сплаве E–AlMgSi, % (мас.)	$a, Дж/(кг \cdot K)$	$b, Дж/(кг \cdot K^2)$	$c, Дж/(кг \cdot K^3)$	$d \cdot 10^{-4}, Дж/(кг \cdot K^4)$	Коэффициент корреляции $R, \%$
Сплав E–AlMgSi	–10394,96	84,30	0,21	1,71	0,9925
+0,05 Bi	–8928,68	72,90	–0,18	1,48	0,9899
+0,1 Bi	–11529,79	89,00	–0,21	1,71	0,9950
+0,5 Bi	–11560,07	89,54	–0,216	1,75	0,9980
+1,0 Bi	–10548,49	81,60	–0,20	1,57	0,9989
Эталон (Al марки A5N)	645,88	0,36	0	0	1,0

Результаты расчета теплоемкости сплавов по формуле (3) через 25 K представлены в табл. 3. Теплоемкость сплавов с повышением концентрации висмута в сплаве E–AlMgSi (алдрей) уменьшается, а с ростом температуры увеличивается. Используя значения удельной теплоемкости сплава E–AlMgSi (алдрей), легированного висмутом, и экспериментально полученные значения скорости охлаждения, вычислили температурную зависимость коэффициента теплоотдачи сплава E–AlMgSi (алдрей) по следующему уравнению:

$$a = \frac{C_p^0 m \frac{dT}{d\tau}}{(T - T_0)S}, \quad (5)$$

где  $T, T_0$  — температура образца и окружающей среды соответственно;  $S, m$  — площадь поверхности и масса образца. Температурная зависимость коэффициента теплоотдачи для сплава E–AlMgSi (алдрей), легированного висмутом представлена на рис. 4.

Для расчета температурной зависимости изменений энтальпии, энтропии и энергии Гиббса по уравнениям (6)—(8) были использованы интегралы от удельной теплоемкости, рассчитанной по уравнению (4):

$$\begin{aligned} [H^0(T) - H^0(T_0)] &= a(T - T_0) + \frac{b}{2}(T^2 - T_0^2) + \\ &+ \frac{c}{3}(T - T_0^3) + \frac{d}{4}(T^4 - T_0^4), \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} [S^0(T) - S^0(T_0)] &= a \ln \frac{T}{T_0} + b(T - T_0) + \\ &+ \frac{c}{2}(T^2 - T_0^2) + \frac{d}{3}(T^3 - T_0^3); \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} [G^0(T) - G^0(T_0)] &= \\ &= [H^0(T) - H^0(T_0)] - T[S^0(T) - S^0(T_0)], \end{aligned} \quad (8)$$

где  $T_0 = 298,15$ .

Результаты расчета температурных зависимостей изменений энтальпии, энтропии и энергии Гиббса по уравнениям (6)—(8) через 25 K представлены в табл. 4.

Известный сплав алдрей представляет собой алюминий, содержащий примеси: 0,3—0,5 % Mg, 0,4—0,7 % Si, 0,2—0,3 % Fe. Обязательными примесями, обуславливающими свойства алдрея, являются магний и кремний, отношение содержания

Таблица 3

**Температурная зависимость удельной теплоемкости сплава E-AlMgSi (алдрей), легированного висмутом и эталона (Al марки A5N) [Temperature dependence of specific heat capacity (kJ/(kg · K)) of E-AlMgSi alloy (Aldrey) doped with bismuth and a standard (A5N grade Al)]**

Содержание висмута в сплаве E-AlMgSi, % (мас.)	Удельная теплоемкость, кДж/(кг·К)						
	300 К	325 К	350 К	375 К	400 К	450 К	500 К
Сплав E-AlMgSi	751,00	855,36	907,62	923,83	920,00	916,37	1025,00
+0,05 Bi	737,65	832,24	882,20	901,42	903,76	913,31	1021,87
+0,1 Bi	590,20	735,49	822,57	867,46	886,20	909,32	1020,20
+0,5 Bi	560,05	701,29	785,45	828,91	848,10	879,25	1010,15
+1,0 Bi	557,44	690,13	769,55	810,40	827,42	848,78	951,40
Эталон (Al марки A5N)	854,62	877,90	901,55	925,45	949,48	997,46	1044,57

Таблица 4

**Температурная зависимость изменений термодинамических функций сплава E-AlMgSi (алдрей), легированного висмутом, и эталона (Al марки A5N) [Temperature dependence of changes in the thermodynamic functions of an E-AlMgSi alloy (Aldrey) doped with bismuth and a standard (A5N grade Al)]**

Содержание висмута в сплаве E–AlMgSi, % (мас.)	Термодинамические функции						
	300 К	325 К	350 К	375 К	400 К	450 К	500 К
$[H^0(T) - H^0(T_0^*)]$ , кДж/кг для сплавов							
Сплав E–AlMgSi	1,3799	21,5847	43,7138	66,6654	89,7383	135,4471	183,2466
+0,05 Bi	1,3562	21,0873	42,5965	64,9414	87,5269	132,7727	180,5087
+0,1 Bi	1,0794	17,7886	37,3691	58,5658	80,5244	125,3141	172,9194
+0,5 Bi	1,0240	16,9277	35,6147	55,8629	76,8600	119,9037	166,4520
+1,0 Bi	1,0199	16,7410	35,0828	54,8974	75,4046	117,2165	161,6372
Эталон (Al марки А5N)	1,5795	23,2351	45,4777	68,3149	91,7514	140,4266	191,4833
$[S^0(T) - S^0(T_0^*)]$ , кДж/кг·К для сплавов							
Сплав E–AlMgSi	0,0046	0,0692	0,1348	0,1982	0,2577	0,3654	0,4660
+0,05 Bi	0,0045	0,0676	0,1313	0,1930	0,2513	0,3579	0,4584
+0,1 Bi	0,0036	0,0570	0,1150	0,1735	0,2302	0,3357	0,4359
+0,5 Bi	0,0034	0,0543	0,1096	0,1655	0,2197	0,3210	0,4190
+1,0 Bi	0,0034	0,0537	0,1080	0,1627	0,2156	0,3141	0,4076
Эталон (Al марки А5N)	0,0053	0,0746	0,1405	0,2035	0,2640	0,3786	0,4862
$[G^0(T) - G^0(T_0^*)]$ , кДж/кг для сплавов							
Сплав E–AlMgSi	–0,0043	–0,9209	–3,4739	–7,6429	–13,3499	–28,9837	–49,7672
+0,05 Bi	–0,0042	–0,9014	–3,3917	–7,4534	–13,0161	–28,2969	–48,7033
+0,1 Bi	–0,0033	–0,7460	–2,8923	–6,5011	–11,5525	–25,7408	–45,0265
+0,5 Bi	–0,0031	–0,7084	–2,7516	–6,1912	–11,0094	–24,5605	–43,0455
+1,0 Bi	–0,0031	–0,7030	–2,7201	–6,1057	–10,8391	–24,1202	–42,1591
Эталон (Al марки А5N)	–0,0049	–1,0111	–3,7068	–8,0133	–13,8629	–29,9625	–51,6098

\*  $T_0 = 298,15$  К.



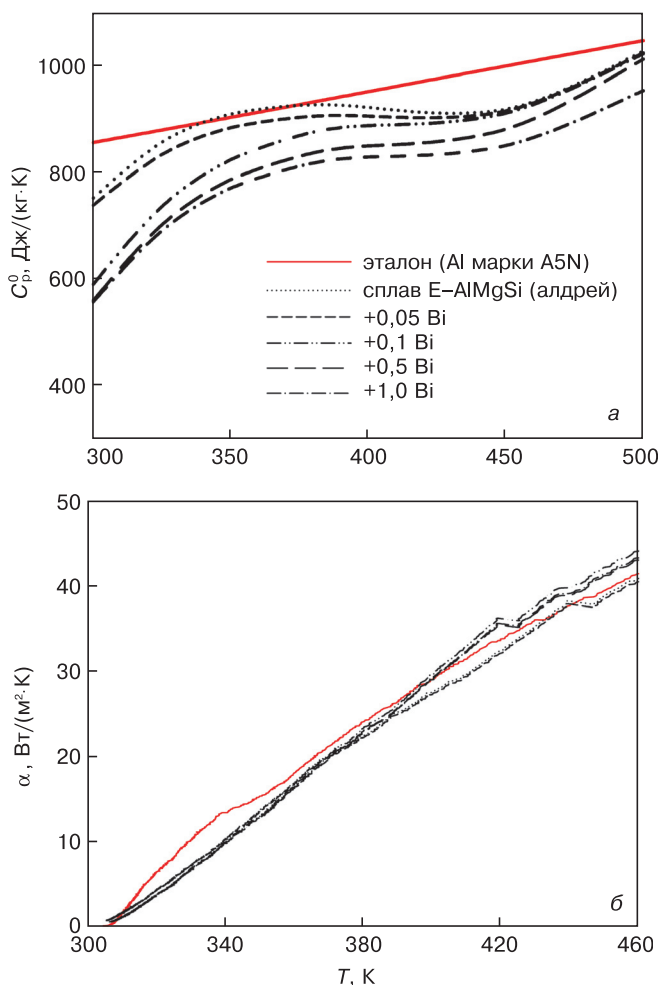


Рис. 3. Температурные зависимости удельной теплоемкости (а) и коэффициента теплоотдачи (б) сплава E-AlMgSi (алдрей) с различным содержанием висмута и эталона (Al марки А5N)

Fig. 3. Temperature dependence of specific heat (a) and heat transfer coefficient (b) of an E-AlMgSi alloy (Aldrey) with bismuth and a reference (A5N grade Al)

которых должно соответствовать формуле соединения  $Mg_2Si$ , образующегося в сплаве и являющегося упрочнителем, сообщаящим ему высокие механические свойства. Однако в практических условиях надо учитывать постоянное присутствие в сплаве железа, которое представляет пока неизбежную, но часто вредную примесь во всяком техническом алюминии, образуя соединение, содержащее кремний ( $Al_6Fe_2Si_3$ ). Поэтому, чтобы полностью обеспечить образование соединения  $Mg_2Si$ , в сплав надо вводить некоторый избыток кремния (0,4—0,5 %) против теоретически необходимого количества [1—3].

Упрочняющее действие соединения  $Mg_2Si$  основано на том, что растворимость его в твердом алюминии с понижением температуры падает. Так, максимальная растворимость  $Mg_2Si$  в алюминии при 595 °C составляет 1,85 %, а при 200 °C — только 0,2 %. Поэтому, если нагретый выше 500 °C сплав типа алдрея, в котором при этой температуре весь  $Mg_2Si$  находится в твердом растворе, быстро охла-

дить (закалить), то получится пересыщенный раствор  $Mg_2Si$  в алюминии [1—3].

При длительном вылеживании избыток  $Mg_2Si$  выделяется из твердого раствора в виде тонкодисперсной структурной составляющей, которая и обуславливает увеличение механической прочности сплава (дисперсионное твердение). Такое вылеживание сплава называется естественным старением. Эффект старения можно ускорить и усилить, применяя незначительный подогрев сплава (до 150—200 °C), т. е. искусственное старение. При старении примесь  $Mg_2Si$  выходит из твердого раствора, что вызывает повышение электропроводности сплава [1—3].

Легирование сплава E-AlMgSi с висмутом позволяет модифицировать первичные выделения двойных и тройных фаз в составе сплава, что в целом положительно влияет на его эксплуатационные характеристики.

Таким образом, в режиме «охлаждения» по известной теплоемкости эталонного образца из алюминия марки А5N установлена теплоемкость сплава E-AlMgSi (алдрей), легированного висмутом. С помощью полученных полиномиальных зависимостей показано, что с ростом температуры теплоемкость, энтальпия и энтропия сплавов увеличиваются, а значения энергии Гиббса уменьшается. Добавки висмута в изученном концентрационном интервале 0,05—1,0 % (мас.) уменьшают теплоемкость, коэффициент теплоотдачи, энтальпию и энтропию исходного сплава E-AlMgSi (алдрей), а энергия Гиббса при этом увеличивается. Рост теплоемкости, коэффициента теплоотдачи, энтальпии и энтропии сплавов от концентрации висмута в сплаве связан с его модифицирующим влиянием на структуру твердого раствора  $\alpha$ -Al и тем самым с увеличением степени гетерогенности структуры многокомпонентных сплавов [16—18].

## Заключение

Представлены результаты исследования температурной зависимости теплоемкости, коэффициента теплоотдачи и термодинамических функций алюминиевого сплава E-AlMgSi (алдрей) с висмутом. Исследования проведены в режиме «охлаждения».

Показано, что с ростом температуры теплоемкость и термодинамические функции сплава E-AlMgSi (алдрей) с висмутом увеличиваются, а значение энергии Гиббса уменьшается. Добавки висмута до 1 % (мас.) уменьшают теплоемкость, коэффициент теплоотдачи, энтальпию и энтропию исходного сплава и увеличивают энергию Гиббса.

## Библиографический список

1. Усов В. В., Займовский А. С. Проводниковые, реостатные и контактные материалы. Материалы и сплавы в электротехнике. В 2-х томах. Т. 2. М.: Госэнергоиздата, 1957. 184 с.

2. Алюминиевые сплавы: свойства, обработка, применение / Отв. ред. Л. Х. Райтбарг. М.: Металлургия, 1979. 679 с.
3. Алиева С. Г., Альтман М. Б., Амбарцумян С. М. и др. Промышленные алюминиевые сплавы: справочник / Отв. ред. Ф. И. Квасов, И. Н. Фридляндер. М.: Металлургия, 1984. 528 с.
4. Белецкий В. М., Кривов Г. А. Алюминиевые сплавы (Состав, свойства, технология, применение) / Под ред. И. Н. Фридляндера. К.: КОМИТЕХ, 2005. 365 с.
5. Chlistovsky R. M., Heffernan P. J., Duquesnay D. L. Corrosion-fatigue behaviour of 7075-T651 aluminum alloy subjected to periodic overloads // *Internat. J. Fatigue*. 2007. V. 29, Iss. 9–11. P. 1941–1949. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2007.01.010
6. Луц А. Р., Суслина А. А. Алюминий и его сплавы. Самара: Самарск. гос. тех. универ. 2013. 81 с.
7. Бердиев А. Э., Ганиев И. Н., Ниезов Х. Х., Обидов Ф. У., Исмоилов Р. А. Влияние иттрия на анодное поведение сплава АК1М2 // *Известия вузов. Материалы электронной техники*, 2014. Т. 17, № 3. С. 224–227. DOI: 10.17073/1609-3577-2014-3-224-227
8. Ганиев И. Н., Отаджонов С. Э., Иброхимов Н. Ф., Махмудов М. Температурная зависимость теплоемкости и изменений термодинамических функций сплава АК1М2, легированного стронцием // *Известия вузов. Материалы электронной техники*. 2018. Т. 21, № 1. С. 35–42. DOI: 10.17073/1609-3577-2018-1-35-42
9. Ниезов Х. Х., Ганиев И. Н., Бердиев А. Э. Сплавы особо чистого алюминия с редкоземельными металлами: Монография. Душанбе: ООО «Сармад компания», 2017. 146 с.
10. Ганиев И. Н., Алиев Ф. А., Одиназода Х. О., Сафаров А. М., Джайлоев Д. Х. Теплоемкость и термодинамические функции алюминиевого проводникового сплава E–AlMgSi (алдрей), легированного галлием // *Известия вузов. Материалы электронной техники*, 2019. Т. 22, № 3. С. 219–227. DOI: 10.17073/1609-3577-2019-3-219-227
11. Ганиев И. Н., Назарова М. Т., Курбонова М. З., Якубов У. Ш. Влияния натрия на удельную теплоемкость и изменение термодинамических функции алюминиевого сплава АБ1 // *Известия Санкт-Петербургского государственного технического института (технологического университета)*. 2019. № 51. С. 25–30. DOI: 10.36807/1998-9849-2019-51-77-25-30
12. 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 AZh4.5 alloy doped with tin // *Russ. J. Non-ferrous Metals*. 2019. V. 60. P. 139–145. DOI: 10.3103/S1067821219020044
13. Ganiev I. N., Mulloeva N. M., Nizomov Z., Obidov F. U. Temperature dependence of the specific heat and thermodynamic functions of alloys of the Pb–Ca system // *High Temp*. 2014. V. 52, Iss. 1. P. 138–140. DOI: 10.1134/S0018151X1401009X
14. Ганиев И. Н., Якубов У. Ш., Сангов М. М., Сафаров А. Г. Влияния кальция на температурную зависимость удельной теплоемкости и изменений термодинамических функции алюминиевого сплава АЖ5К10 // *Вестник Казанского технологического университета*. 2018. Т. 21, № 8. С. 11–15.
15. Ниезов О. Х., Ганиев И. Н., Сафаров А. Г., Муллоева Н. М., Якубов У. Ш. Температурная зависимость теплоемкости и изменение термодинамических функций свинцового сплава ССуЗ с кальцием // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. Металлургия*. 2019. Т. 19, № 3. С. 33–43. DOI: 10.14529/met190304
16. Мальцев М. В. Модификаторы структуры металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1964. 238 с.
17. Ганиев И. Н., Вахобов А. В. Стронций–эффективный модификатор силуминов // *Литейное производство*. 2000. № 5. С. 28–29.
18. Каргаполова Т. Б., Ганиев И. Н., Махмадуллоев Х. А., Хакдодов М. М. Барий новый модификатор силуминов // *Литейное производство*. 2000. № 10. С. 9–10.

Статья поступила в редакцию 28 января 2020 г.

*Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronics Engineering*. 2020, vol. 23, no. 1, pp. 86–93.  
DOI: 10.17073/1609-3577-2020-1-86-93

## Influence of bismuth additives on the thermophysical and thermodynamic properties of aluminum conductive alloy E–AlMgSi (Aldrey)

I. N. Ganiev<sup>1,§</sup>, A. P. Abulakov<sup>2</sup>, J. H. Jayloev<sup>3</sup>, U. S. Yakubov<sup>3</sup>, A. G. Safarov<sup>3</sup>, V. D. Abulkhaev<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup> *Dangarinsk State University,  
25 Markazi Str., Dangara 735320, Tajikistan*

<sup>3</sup> *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.** The economic feasibility of using aluminum as a conductive material is explained by the favorable ratio of its cost to the cost of copper. It is also important that the cost of aluminum for many years remains virtually unchanged. 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, which even in a soft state have strength characteristics that allow them to be used as a conductive material.

One of the promising areas for the use of aluminum is the electrical industry. Conducting aluminum alloys of the E–AlMgSi type (Aldrey) are representatives of this group of alloys. The paper presents the results of a study of the temperature dependence of heat capacity, heat transfer coefficient, and thermodynamic functions of an aluminum alloy E–AlMgSi (Aldrey) with bismuth. Research conducted in the “cooling” mode.

### Information about authors:

**Izatullo N. Ganiev<sup>1,§</sup>:** Academician of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan, Dr. Sci. (Chem.), Professor of Department “Technology of Chemical Production” (ganiev48@mail.ru); **Aslam P. Abdulakov<sup>2</sup>:** Assistant at the Department of “Rural Construction, Hydrotechnics and Geology”; **Jamshed H. Jayloev<sup>3</sup>:** Senior Researcher (husenzod85@mail.ru); **Umarali Sh. Yakubov<sup>3</sup>:** Senior Researcher (yakubovumarali@gmail.com); **Amirsho G. Safarov<sup>3</sup>:** Senior Researcher (amirsho71@mail.ru); **Vladimir Dz. Abulkhaev<sup>3</sup>:** Dr. Sci. (Chem.), Professor, Deputy Director (abulkhaev-48@mail.ru)

§ Corresponding author

It was shown that the temperature capacity and the thermodynamic functions of the alloy E–AlMgSi (Aldrey) with bismuth increase with temperature, and the Gibbs energy decreases. Additives of bismuth up to 1 wt.% Reduce heat capacity, heat transfer coefficient, enthalpy and entropy of the initial alloy and increase the value of Gibbs energy.

**Keywords:** aluminum alloy E–AlMgSi (Aldrey), bismuth, heat capacity, heat transfer coefficient, “cooling” mode, enthalpy, entropy, Gibbs energy

### References

1. Usov V. V., Zaimovsky A. S. *Provodnikovye, reostatnye i kontaktnye materialy. Materialy i splavy v elektrotekhnike* [Conductor, rheostat and contact materials. Materials and alloys in electrical engineering]. Vol. 2. Moscow; Leningrad: Gosenergoizdat, 1957, 184 p. (In Russ.)
2. *Alyuminiyevye splavy: svoystva, obrabotka, primeneniye* [Aluminum alloys: properties, processing, application]. Moscow: Metallurgy, 1979, 679 p. (In Russ.)
3. Alieva S. G., Altman M. B., Ambartsumyan S. M. et al. *Pro-myshlennyye alyuminiyevye splavy: Spravochnik* [Industrial aluminum alloys: Handbook]. Moscow: Metallurgy, 1984, 528 p. (In Russ.)
4. Beleskiy V. M., Krivov G. A. *Alyuminiyevye splavy (Sostav, svoystva, tekhnologiya, primeneniye)* [Aluminum alloys (Composition, properties, technology, application)]. Kiev: KOMITEKh, 2005, 365 p. (In Russ.)
5. Chlistovsky R. M., Heffernan P. J., DuQuesnay D. L. Corrosion-fatigue behaviour of 7075–T651 aluminum alloy subjected to periodic overloads. *Internat. J. Fatigue*, 2007, vol. 29, no. 9–11, pp. 1941–1949. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2007.01.010
6. Luts A. R., Suslina A. A. *Alyuminiy i ego splavy* [Aluminum and its alloys]. Samara: Samara State Technical University, 2013, 81 p. (In Russ.)
7. Berdiev A. E., Ganiev I. N., Niyozov H. H., Obidov F. U., Ismoilov R. A. Influence of Yttrium on the Anodic Behavior of the Alloy AK1M2. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Materialy Elektronnoi Tekhniki = Materials of Electronics Engineering*, 2014, vol. 17, no. 3, pp. 224–227. (In Russ.). DOI: 10.17073/1609-3577-2014-3-224-227
8. Ganiev I. N., Otajonov S. E., Ibrohimov N. F., Mahmudov M. Temperature dependence of the specific heat and thermodynamic functions AK1M2 alloy, doped strontium. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Materialy Elektronnoi Tekhniki = Materials of Electronics Engineering*, 2018, vol. 21, no. 1, pp. 35–42. (In Russ.). DOI: 10.17073/1609-3577-2018-1-35-42
9. Niezov Kh. Kh., Ganiev I. N., Berdiev A. E. *Splavy osobochistogo alyuminiya s redkozemel'nyimi metallami* [Alloys high purity aluminum with rare-earth metals]. Dushanbe: Sarmad kompaniya, 2017, 146 p. (In Russ.)
10. Ganiev I. N., Aliev F. A., Odiazoda H. O., Safarov A. M., Jaylov J. H. Heat capacity and thermodynamic functions of aluminum conductive alloy E–AlMgSi (Aldrey) doped with gallium. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Materialy Elektronnoi Tekhniki = Materials of Electronics Engineering*, 2019, vol. 22, no. 3, pp. 219–227. (In Russ.). DOI: 10.17073/1609-3577-2019-3-219-227
11. Ganiev I. N., Nazarova M. T., Kurbonova M. Z., Yakubov U. Sh. Effects of sodium on the specific heat capacity and changes of thermodynamic functions of the aluminum alloy AB1. *Bulletin of the St. Petersburg State Technological Institute (Technical University)*, 2019, no. 51, pp. 25–30. DOI: 10.36807/1998-9849-2019-51-77-25-30
12. 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 AZh4.5 alloy doped with tin. *Russ. J. Non-ferrous Metals*, 2019, vol. 60, pp. 139–145. DOI: 10.3103/S1067821219020044
13. Ganiev I. N., Mulloeva N. M., Nizomov Z., Obidov F. U. Temperature dependence of the specific heat and thermodynamic functions of alloys of the Pb–Ca system. *High Temp.*, 2014, vol. 52, no. 1, pp. 138–140. DOI: 10.1134/S0018151X1401009X
14. 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.)
15. Niyozov O. H., Ganiev I. N., Safarov A. G., Mulloeva N. M., Yakubov U. Sh. The temperature dependence of calorific capacity and thermodynamic function changes for the composition of lead–antimony–3 alloy and calcium. *Bulletin of the South Ural State University. Series Metallurgy*, 2019, vol. 19, no. 3, pp. 33–43. (In Russ.). DOI: 10.14529/met190304
16. Maltsev M. V. *Modifikatory struktury metallov i splavov* [Modifiers of the structure of metals and alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1964, 238 p. (In Russ.)
17. Vahobov A. V., Ganiev I. N. Strontium – the effective modifier of silumin. *Liteinoe proizvodstvo = Foundry. Technologies and Equipment*, 2000, no. 5, pp. 28–29. (In Russ.)
18. 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. 6–9. (In Russ.)

Received January 28, 2020

\* \* \*