

И.Н. Ганиев¹, Х.Х. Ниёзов, ¹Б.Н. Гулов, ¹З. Низомов¹, А.Э. Бердиев²

¹Таджикский национальный университет

² Российско-Таджикский (Славянский) университет, г. Душанбе

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ТЕПЛОЕМКОСТИ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ СПЛАВА АК1М2, ЛЕГИРОВАННОГО ПРАЗЕОДИМОМ И НЕОДИМОМ

В отечественной и зарубежной практике для создания тонких металлических пленок при разработке интегральных микросхем наметился поворот от использования индивидуальных металлических материалов к сплавам на основе высокочистых металлов, содержащих два или более легирующих компонента. Такой поворот весьма естественен, поскольку при использовании в качестве проводникового материала чистых металлов возможен целый ряд технологических и эксплуатационных отклонений, устранить которые можно, используя процесс микролегирования. Однако на пути использования микролегирующих добавок возникает ряд проблем, незнание и пренебрежение которыми может привести к отрицательным результатам. К числу таких проблем, прежде всего, относятся:

- выбор вида и оптимального состава добавок;
- примесная чистота легирующих компонентов, которая на сегодняшний день трудно разрешима;
- наличие стабильной технологии и надежной аппаратуры для получения сплавов высокой чистоты и отсутствие в достаточной степени разработанной теоретической базы для выбора нужных композиций [1 – 3].

Познания природы, структуры и свойств сплавов высокой чистоты на основе алюминия позволяют резко изменить в лучшую сторону служебные характеристики приборов, а также служат источником для расширения сферы применения алюминия высокой степени чистоты в других областях науки, техники и порой раскрывают у них новые свойства. В этом плане работа, связанная с использованием новых сплавов на основе особочистого алюминия, является актуальной и своевременной [4].

К сожалению, на сегодняшний день остались незаслуженно обойденными вниманием исследователей вопросы разработки теоретиче-

ских основ для выбора нужных композиций сплавов, к числу которых относятся исследования физико-химических свойств сплавов на основе особочистого алюминия. К таким системам можно отнести алюминиево-кремниевый сплав АК1 и сплав с медью АК1М2 с участием редкоземельных элементов [4].

Материалы и методика исследования

Измерения теплоемкости и ее температурной зависимости хода процесса играют большую роль в исследованиях сплавов. В литературе практически отсутствуют экспериментальные данные по теплоемкости многокомпонентных алюминиевых сплавов.

Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию температурной зависимости удельной теплоемкости сплава АК1М2 (Al + 1 % Si + 2 % Cu), легированного празеодимом и неодимом. Поскольку монотонное изменение температуры объекта в режиме «нагрева» осуществить крайне сложно из-за наличия целой цепочки внешних факторов (напряжение в сети питания печи, теплопроводность окружающей среды и пр.), т.е. из-за многофакторности эксперимента наиболее удобным и простым с этой точки зрения является режим «охлаждения» образца.

Теплоемкость сплавов измеряли на установке, в основу работы которой положен метод С-калориметра с тепломером и адиабатической оболочкой. Методика измерения теплоемкости и схема установки описаны в работах [5 – 12].

Принцип измерения теплоемкости заключается в том, что тепловой поток, проходящий через среднее сечение тепломера, идет на разогрев испытуемого образца и ампулы. Величина теплового потока, проходящего через тепломер, оценивается по перепаду температуры на тепломере и тепловой проводимости тепломера, определенной из независимых градуиро-

вочных экспериментов с медным образцом. Температурный диапазон — до 800 К.

Для измерения удельной теплоемкости металлов использовали закон охлаждения Ньютона-Рихмана. Всякое тело, имеющее температуру выше окружающей среды, будет охлаждаться, причем скорость охлаждения зависит от величины теплоемкости тела и коэффициента теплоотдачи [11, 12].

Если взять два металлических стержня определенной формы, то, сравнивая кривые охлаждения (температуры как функции времени) этих образцов, один из которых служит эталоном (его теплоемкость и скорость охлаждения должны быть известны), можно определить теплоемкость другого, определив скорость его охлаждения.

Количество теплоты δQ , теряемое предварительно нагретым телом массой m при его охлаждении на dT градус, будет

$$\delta Q = C_p^0 m dT, \quad (1)$$

где C_p^0 — стандартная удельная теплоемкость вещества, из которого состоит тело при постоянном давлении.

Потеря энергии происходит через поверхность тела. Следовательно, можно считать, что количество теплоты δQ_s , теряемое через поверхность тела за время $d\tau$, будет пропорционально времени, площади поверхности S и разности температур T тела и окружающей среды T_0 :

$$\delta Q_s = -\alpha(T - T_0)S d\tau. \quad (2)$$

Коэффициент теплоотдачи α при перепаде температур на 1 К измеряется в Вт/(м²·К). В реальности он не всегда постоянен и может зависеть от разности температур, делая закон приблизительным. Если рассматривать тепловой поток как вектор, то он направлен перпендикулярно площадке поверхности, через которую протекает α — количество теплоты, отдаваемое с 1 м² поверхности за единицу времени при единичном температурном напоре. Тепловой поток зависит от вида теплоносителя и его температуры; температуры напора, вида конвекции и режима течения; состояния поверхности и направления обтекания; геометрии тела. Поэтому α — функция процесса теплоотдачи — величина расчетная, а не табличная, и определяется экспериментально.

Если тело выделяет теплоту так, что температура всех его точек изменяется одинаково, то будет справедливо равенство:

$$\delta Q = \delta Q_s \text{ и } C_p^0 m dT = -\alpha(T - T_0)S d\tau. \quad (3)$$

Выражение (3) можно представить в виде

$$C_p^0 m \frac{dT}{d\tau} = -\alpha(T - T_0)S. \quad (4)$$

Полагая, что C_p^0 , α , T и T_0 в малом интервале температур не зависят от координат точек поверхности образца, нагретых до одной температуры, и одинаковой температуры окружающей среды, напомним соотношение (4) для двух образцов:

$$C_{p1}^0 m_1 S_1 \alpha_1 \left(\frac{dT}{d\tau}\right)_1 = C_{p2}^0 m_2 S_2 \alpha_2 \left(\frac{dT}{d\tau}\right)_2. \quad (5)$$

При использовании этой формулы для двух образцов (эталона и любого другого), имеющих одинаковые размеры $S_1 = S_2$ и состояния поверхностей предполагают равными, их коэффициенты теплоотдачи $\alpha_1 = \alpha_2$:

$$C_{p1}^0 m_1 \left(\frac{dT}{d\tau}\right)_1 = C_{p2}^0 m_2 \left(\frac{dT}{d\tau}\right)_2. \quad (6)$$

Следовательно, зная массы образцов m_1 и m_2 , скорости охлаждения эталона $\left(\frac{dT}{d\tau}\right)_1$ и образцов $\left(\frac{dT}{d\tau}\right)_2$ и удельную теплоемкость C_{p1}^0 эталона, можно вычислить теплоемкость другого вещества C_{p2}^0 :

$$C_{p2}^0 = \frac{C_{p1}^0 m_1 \left(\frac{dT}{d\tau}\right)_1}{m_2 \left(\frac{dT}{d\tau}\right)_2}. \quad (7)$$

Для оправданности такого допущения авторами работы [11] были получены зависимости температуры образцов от времени охлаждения для алюминия и меди. Полученные результаты хорошо согласуются с литературными данными [13, 14].

В рамках настоящей работы исследовано влияние празеодима и неодима на теплоемкость и термодинамические функции сплава АК1М2. Для получения сплавов были использованы особочистый алюминий марки А5N (99,999 %Al), монокристаллический кремний, а также промышленная лигатура на основе алюминия, содержащая по 4,0 % празеодима и неодима. Содержание последних в сплаве составляло: 0,005; 0,05; 0,1; 0,2 и 0,5 % (по массе). Легирование сплавов лигатурой осуществ-

ляли в открытых шахтных печах типа СШОЛ. Затем из расплавов отливались цилиндрические образцы размером 30x16 мм.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Экспериментально полученные временные зависимости температуры образцов описывали уравнением вида

$$T = ae^{-bt} + pe^{-kt}, \quad (8)$$

где a, b, p, k – константы; τ – время охлаждения.

Дифференцируя выражение (8) по τ , получаем уравнение для скорости охлаждения образцов

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

Ранее в работе [15] было показано, что значения коэффициента теплоотдачи α для меди, алюминия и цинка сильно отличаются. Поэтому при определении удельной теплоемкости относительным методом для исследованной группы легированных сплавов использовали значение α , Вт/(м²·К), для сплава Al+2%Cu, определенное нами ранее в работе [16]:

$$|\alpha(T)| = -4,850 + 0,0418T + 4,516 \cdot 10^{-5} T^2 - 5,7191 \cdot 10^{-8} T^3, \quad (10)$$

считая что, оно не зависит от концентрации легирующего металла. Далее была вычислена

удельная теплоемкость исследуемых сплавов по формуле

$$C_p^0 = \frac{|\alpha(T)| S (T - T_0)}{m (dT/d\tau)}, \quad (11)$$

где m и S – соответственно масса и площадь поверхности образца; T и T_0 – температура образца и окружающей среды.

Используя выражение (7), получили следующие уравнения температурной зависимости теплоемкости:

для сплава АК1М2:

$$C_{p \text{ АК1М2}}^0 = 636,6712 + 0,3694T + 1,428 \cdot 10^{-4} T^2 - 1,1913 \cdot 10^{-6} T^3.$$

Для сплавов, легированных празеодимом и неодимом, такие зависимости представлены формулами (12).

В табл. 1 приведена температурная зависимость удельной теплоемкости сплава АК1М2, легированного различным количеством празеодима и неодима.

Приведенные данные показывают, что при низких температурах теплоемкость легированных сплавов меньше чем, у исходного сплава, а при высоких температурах больше для всех исследованных концентраций.

Для расчета температурной зависимости энтальпии, энтропии и энергии Гиббса использовали интегралы от удельной теплоемкости (13).

$$\begin{aligned} \text{АК1М2 0,05 Pr: } C_p^0 &= 636,0754 + 0,3698T + 1,4387 \cdot 10^{-4} T^2 - 1,1908 \cdot 10^{-6} T^3; \\ \text{АК1М2 0,1 Pr: } C_p^0 &= 636,374 + 0,3696T + 1,4333 \cdot 10^{-4} T^2 - 1,1911 \cdot 10^{-6} T^3; \\ \text{АК1М2 0,5 Pr: } C_p^0 &= 633,4693 + 0,3727T + 1,5056 \cdot 10^{-4} T^2 - 1,1905 \cdot 10^{-6} T^3; \\ \text{АК1М2 0,05 Nd: } C_p^0 &= 636,4344 + 0,3693T + 1,4274 \cdot 10^{-4} T^2 - 1,191 \cdot 10^{-6} T^3; \\ \text{АК1М2 0,1 Nd: } C_p^0 &= 636,1983 + 0,3691T + 1,427 \cdot 10^{-4} T^2 - 1,190 \cdot 10^{-6} T^3; \\ \text{АК1М2 0,5 Nd: } C_p^0 &= 636,4344 + 0,36T + 1,4216 \cdot 10^{-4} T^2 - 1,1883 \cdot 10^{-6} T^3. \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} H^0(T) - H^0(298,15) &= \int_{298,15}^T C_p^0 dT; \\ S^0(T) - S^0(298,15) &= \int_{298,15}^T \frac{C_p^0(T)}{T} dT; \\ [G^0(T) - G^0(298,15)] &= [H^0(T) - H^0(298,15)] - T[S^0(T) - S^0(298,15)]. \end{aligned} \quad (13)$$

Зависимость удельной теплоемкости сплава АК1М2, легированного празеодимом (верхний ряд) и неодимом (нижний ряд) от температуры

T, K	Значения $C_p^0(T)$, Дж/(кг·K), для сплавов			
	AK1M2	AK1M2+ 0,05 % P3M	AK1M2+ 0,1 % P3M	AK1M2+ 0,5 % P3M
300	766,80	766,22	766,51	763,87
		766,53	766,24	764,00
400	837,83	837,19	837,51	834,65
		837,54	837,22	834,82
500	934,58	933,86	934,23	930,99
		934,27	933,92	931,31
600	1064,22	1063,38	1063,81	1060,04
		1063,88	1063,49	1060,60
700	1233,89	1232,88	1233,41	1228,93
		1233,51	1233,07	1229,84
800	1450,74	1449,53	1450,17	1444,81
		1450,31	1449,81	1446,14

Получены следующие уравнения температурной зависимости энтальпии (Дж/кг):

для сплава АК1М2:

$$\text{AK1M2: } H^0(T) - H^0(298,15) = -205150,2783 + (636,6712 \cdot T) + (0,1847 \cdot T^2) - (4,76 \cdot 10^{-5} \cdot T^3) - (2,9782 \cdot 10^{-7} \cdot T^4);$$

для сплавов с празеодимом и неодимом % (по массе):

$$\text{AK1M2 0,05 Pr: } H^0(T) - H^0(298,15) = -205000,85 + (636,0754 \cdot T) + (0,1849 \cdot T^2) - (4,8 \cdot 10^{-5} \cdot T^3) - (3 \cdot 10^{-7} \cdot T^4);$$

$$\text{AK1M2 0,1 Pr: } H^0(T) - H^0(298,15) = -505075,63 + (636,374 \cdot T) + (0,1848 \cdot T^2) + (4,777 \cdot 10^{-5} \cdot T^3) - (2,977 \cdot 10^{-7} \cdot T^4);$$

$$\text{AK1M2 0,5 Pr: } H^0(T) - H^0(298,15) = -204412,44 + (633,4693 \cdot T) + (0,1863 \cdot T^2) - (5,018 \cdot 10^{-5} \cdot T^3) + (2,97 \cdot 10^{-7} \cdot T^4);$$

$$\text{AK1M2 0,05 Nd: } H^0(T) - H^0(298,15) = -205075,2943 + (636,4344 \cdot T) + (0,1846 \cdot T^2) + (4,758 \cdot 10^{-5} \cdot T^3) - (2,9775 \cdot 10^{-7} \cdot T^4);$$

$$\text{AK1M2 0,1 Nd: } H^0(T) - H^0(298,15) = -204997 + (636,1983 \cdot T) + (0,1845 \cdot T^2) + (4,756 \cdot 10^{-5} \cdot T^3) - (2,975 \cdot 10^{-7} \cdot T^4);$$

$$\text{AK1M2 0,5 Nd: } H^0(T) - H^0(298,15) = -204662,1497 + (636,4344 \cdot T) + (0,18 \cdot T^2) + (4,738 \cdot 10^{-5} \cdot T^3) - (3 \cdot 10^{-7} \cdot T^4).$$

В табл. 2 приведена температурная зависимость изменения энтальпии для сплава АК1М2, легированного празеодимом и неодимом, рассчитанная по этим уравнениям.

Для температурной зависимости энтропии (Дж/(кг·К)) сплава АК1М2 с празеодимом и неодимом получены следующие уравнения:

для сплава АК1М2

$$\text{АК1М2: } S^0(T) - S^0(298,15) = -3733,4547 + (636,6712(\ln T)) + (0,3694 \cdot T) - (7,14 \cdot 10^{-5} \cdot T^2) - (3,971 \cdot 10^{-7} \cdot T^3);$$

для сплавов с празеодимом и неодимом % (по массе):

$$\text{АК1М2 0,05 Pr: } S^0(T) - S^0(298,15) = -3730,2313 + (636,0754(\ln T)) + (0,3698 \cdot T) + (7,2 \cdot 10^{-5} \cdot T^2) - (3,969 \cdot 10^{-7} \cdot T^3);$$

$$\text{АК1М2 0,1 Pr: } S^0(T) - S^0(298,15) = -3731,8463 + (636,374(\ln T)) + (0,3696 \cdot T) + (7,1665 \cdot 10^{-5} \cdot T^2) - (3,97 \cdot 10^{-7} \cdot T^3);$$

$$\text{АК1М2 0,5 Pr: } S^0(T) - S^0(298,15) = -3716,5475 + (633,4693(\ln T)) + (0,3727 \cdot T) + (7,528 \cdot 10^{-5} \cdot T^2) - (3,9683 \cdot 10^{-7} \cdot T^3);$$

$$\text{АК1М2 0,05 Nd: } S^0(T) - S^0(298,15) = -3732,076 + (636,4344(\ln T)) + (0,3693 \cdot T) - (7,137 \cdot 10^{-5} \cdot T^2) - (3,97 \cdot 10^{-7} \cdot T^3);$$

$$\text{АК1М2 0,1 Nd: } S^0(T) - S^0(298,15) = -3730,678 + (636,1983(\ln T)) + (0,3691 \cdot T) + (7,135 \cdot 10^{-5} \cdot T^2) - (3,966 \cdot 10^{-7} \cdot T^3);$$

$$\text{АК1М2 0,5 Nd: } S^0(T) - S^0(298,15) = -3729,301 + (636,4344(\ln T)) + (0,36 \cdot T) + (7,108 \cdot 10^{-5} \cdot T^2) - (3,961 \cdot 10^{-7} \cdot T^3).$$

Т а б л и ц а 2

Изменение температурной зависимости энтальпии сплава АК1М2, легированного празеодимом (верхний ряд) и неодимом (нижний ряд)

T, К	Значения $H^0(T) - H^0(298,15)$, для сплавов			
	АК1М2	АК1М2+ 0,05 % РЗМ	АК1М2+ 0,1 % РЗМ	АК1М2+ 0,5 % РЗМ
300	1,35	1,32	1,34	1,34
		1,34	1,34	1,31
400	74,49	74,40	74,47	74,39
		74,45	74,42	74,06
500	146,70	146,51	146,67	146,60
		146,63	146,57	145,72
600	215,03	214,69	215,01	215,08
		214,93	214,85	213,35
700	275,84	275,28	275,84	276,20
		275,71	275,62	273,26
800	324,78	323,89	324,81	325,63
		324,61	324,53	321,06

В табл. 3 приведены значения изменения температурной зависимости энтропии (кДж/(кг·К)) для сплава АК1М2, легированного празеодимом и неодимом, рассчитанные по вышеприведенным уравнениям.

По температурной зависимости энергии Гиббса (Дж/кг) для сплава АК1М2 и сплавов, легированных празеодимом и неодимом, получены уравнения:

$$\text{AK1M2: } G^0(T) - G^0(298,15) = (-205150,2783) + (4369,75 \cdot T) - (0,1847 \cdot T^2) - (2,38 \cdot 10^{-5} \cdot T^3) + (9,91 \cdot 10^{-8} \cdot T^4) - (636,6712 \cdot T)(\ln T);$$

$$\text{AK1M2 0.05 Pr: } G^0(T) - G^0(298,15) = (-205000,8599) + (4366,3067 \cdot T) - (0,1849 \cdot T^2) - (2,4 \cdot 10^{-5} \cdot T^3) + (9,69 \cdot 10^{-8} \cdot T^4) - (636,0754 \cdot T)(\ln T);$$

$$\text{AK1M2 0.1 Pr: } G^0(T) - G^0(298,15) = (-205075,6349) + (4368,22 \cdot T) - (0,1848 \cdot T^2) - (2,3895 \cdot 10^{-5} \cdot T^3) + (9,93 \cdot 10^{-8} \cdot T^4) - (636,374 \cdot T)(\ln T);$$

$$\text{AK1M2 0,5 Pr: } G^0(T) - G^0(298,15) = (-204412,4423) + (4350 \cdot T) - (0,1863 \cdot T^2) - (2,51 \cdot 10^{-5} \cdot T^3) + (9,98 \cdot 10^{-8} \cdot T^4) - (633,4693 \cdot T)(\ln T);$$

$$\text{AK1M2 0,05Nd: } G^0(T) - G^0(298,15) = (-205075,2943) + (4368,50 \cdot T) - (0,184 \cdot T^2) - (2,379 \cdot 10^{-5} \cdot T^3) + (9,925 \cdot 10^{-8} \cdot T^4) - (636,4344 \cdot T)(\ln T);$$

$$\text{AK1M2 0,1Nd: } G^0(T) - G^0(298,15) = (-204997,6339) + (4366,68 \cdot T) - (0,1847 \cdot T^2) - (2,379 \cdot 10^{-5} \cdot T^3) + (9,91 \cdot 10^{-8} \cdot T^4) - (636,1983 \cdot T)(\ln T);$$

$$\text{AK1M2 0,5Nd: } G^0(T) - G^0(298,15) = (-204662,1497) + (4365,73 \cdot T) - (0,18 \cdot T^2) - (2,37 \cdot 10^{-5} \cdot T^3) + (9,61 \cdot 10^{-8} \cdot T^4) - (636,4344 \cdot T)(\ln T).$$

Т а б л и ц а 3

Изменение температурной зависимости энтропии сплава АК1М2, легированного празеодимом (верхний ряд) и неодимом (нижний ряд)

T, К	$S^0(T) - S^0(298,15)$, кДж/(кг·К), для сплавов			
	AK1M2	AK1M2+ 0,05 % PЗМ	AK1M2+ 0,1 % PЗМ	AK1M2+ 0,5 % PЗМ
300	0,0045	0,0045	0,0045	0,0045
		0,0045	0,0045	0,0044
400	0,21	0,21	0,21	0,21
		0,21	0,21	0,21
500	0,37	0,37	0,37	0,37
		0,37	0,37	0,37
600	0,50	0,50	0,50	0,50
		0,50	0,50	0,49
700	0,59	0,59	0,59	0,59
		0,59	0,59	0,60
800	0,66	0,66	0,66	0,66
		0,66	0,65	0,65

В табл. 4 приведена температурная зависимость изменения энергии Гиббса (кДж/кг) для сплава АК1М2, легированного празеодимом и неодимом, рассчитанная по приведенным уравнениям.

Выводы. В режиме «охлаждения» исследована температурная зависимость теплоемкости и изменения термодинамических функций сплава АК1М2, легированного празеодимом и неодимом в диапазоне температур 298,15 – 800 К. Показано, что с ростом температуры теплоемкость, энтальпия и энтропия сплавов увеличиваются, а с повышением концентрации легирующего ком-

понента уменьшаются. Энергия Гиббса сплавов характеризуется обратной зависимостью, т.е. от температуры – уменьшается, от содержания легирующего компонента – растет. Сплавы, содержащие неодим, характеризуются более высокими значениями теплоемкости, энтальпии и энтропии и несколько меньшими значениями энергии Гиббса. Уменьшение теплоемкости объясняется увеличением степени гетерогенности сплавов при их легировании празеодимом и неодимом, из-за модифицирующего влияния этих элементов на характер кристаллизации алюминиевого твердого раствора [17, 18].

Т а б л и ц а 4

Изменение температурной зависимости энергии Гиббса сплава АК1М2, легированного празеодимом (верхний ряд) и неодимом (нижний ряд)

T, K	$G^0(T) - G^0(298,15)$, кДж/кг, для сплавов			
	AK1M2	AK1M2+ 0,05 % Nd	AK1M2+ 0,1 % Nd	AK1M2+ 0,5 % Nd
300	-0,11	$-2,36 \cdot 10^{-2}$	$-4,13 \cdot 10^{-3}$	$-8,98 \cdot 10^{-5}$
		0,051292	-0,07663	-0,02965
400	-11,62	-11,5268	-11,4677	-11,4355
		-11,3667	-11,5664	-11,4964
500	-41,56	-41,4959	-41,3538	-41,26916
		-41,1911	-41,4736	-41,3486
600	-85,73	-85,7644	-85,4675	-85,32309
		-85,2268	-85,6057	-85,4244
700	-140,81	-141,04	-140,484	-140,2826
		-140,148	-140,64	-140,44
800	-203,87	-204,423	-203,463	-203,2146
		-203,016	-203,641	-203,503

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Луц А.Р., Суслина А.А. Алюминий и его сплавы. – Самара: СГТУ, 2013. – 81 с.
2. Алюминиевые сплавы (Состав, свойства, технология, применение.) Справочник / Под общей ред. И.Н. Фридляндера. – Киев: Коминтех, 2005. – 365 с.
3. Золоторевский В.С., Белов Н.А. Металловедение литейных алюминиевых сплавов. – М.: МИСиС, 2005. – 376 с.
4. Ниёзов Х.Х., Ганиев И.Н., Бердиев А.Э. Сплавы особочистого алюминия с редкоземельными металлами. – Душанбе: ЧДММ «Сармад компания», 2017. – 146 с.
5. Ganiev I.N., Mulloeva N.M., Nizomov Z., Obidov F.U. Temperature dependence of the specific heat and thermodynamic functions of alloys of the Pb-Ca system // High Temperature. 2014. Vol. 52. Iss. 1. P. 138 – 140.
6. Муллоева Н.М., Ганиев И.Н., Эшов Б.Б., Махмадуллоев Х.А., Низомов З. Теплофизические свойства и термодинамические функции сплавов системы Pb-Sr. // Известия Самарского научно центра Российской Академии наук. 2014. Т. 6. № 6. С. 38 – 42.
7. Иброхимов Н.Ф., Ганиев И.Н., Низомов З., Ганиева Н.И., Иброхимов С.Ж. Влияние церия на теплофизические свойства сплава АМг2 // Физика металлов и материаловедение. 2016. Т. 117. № 1. С. 53 – 58.
8. Муллоева Н.М., Ганиев И.Н., Махмадуллоев Х.А. Теплофизические и термодинамические свойства сплавов свинца с щелочноземельными металлами. – Германия: Изд. дом LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. – 152 с.
9. Иброхимов С.Ж., Эшов Б.Б., Ганиев И.Н., Иброхимов Н.Ф. Влияние скандия на физико-химические свойства сплава АМг4 // Известия Самарского научно центра Российской Академии наук. 2014. Т. 16. № 4. С. 256 – 260.
10. Бердиев А.Э., Ганиев И.Н., Ниёзов Х.Х., Дадаматов Х.Д. Термодинамические функции сплава АК1М2, легированного неодимом: Материалы Международной научно-технической конференции «Нефть и газ Западной Сибири», посвященной 50-летию Тюменского индустриального института. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2013. С. 88 – 93.
11. Низомов З., Гулов Б.Н., Ганиев И.Н. и др. Исследование температурной зависимости удельной теплоемкости алюминия марок ОСЧ и А7 // Доклады АН Республики Таджикистан. 2011. Т. 54. № 1. С. 53 – 59.
12. Низомов З., Гулов Б.Н., Ганиев И.Н. и др. Температурная зависимость теплоёмкости сплава АК1М2, легированного редкоземельными металлами // Доклады АН Республики Таджикистан. 2011. Т. 54. № 11. С. 917 – 921.
13. Зиновьев В.Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах: Справ. изд. – М.: Металлургия, 1984. – 384 с.
14. Маджидов Х., Аминов Б., Сафаров М., Вахобов А., Обидов Ф.У. // Доклады АН Республики Таджикистан. 1990. Т. 33. № 6. С. 380 – 383.
15. Низомов З., Саидов Р.Х., Гулов Б.Н., Аевзов З. Исследование температурной зависимости коэффициента теплоотдачи меди,

- алюминия А7 и цинка. – Материалы Международной конф. «Современные проблемы физики конденсированных сред и астрофизики». – Душанбе: Бахт LTD, 2010. С. 38 – 41.
- 16.** Гулов Б.Н., Саидов Р.Х., Низомов З. Исследование температурной зависимости термодинамических свойств сплава АК1+2%Cu // Вестник Таджикского технического университета. 2012. Вып. 1 (17). С. 7 – 11.
- 17.** Мальцев М.В. Модификаторы структуры металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1964. – 238 с.
- 18.** Ганиев И.Н., Пархутик П.А., Вахобов А.В., Куприянова И.Ю. Модифицирование силуминов стронцием. – Минск: Наука и техника, 1985. – 143 с.
- © 2017 г. И.Н. Ганиев, Х.Х. Ниёзов,
Б.Н. Гулов, З. Низомов, А.Э. Бердиев
Поступила 23 июля 2017 г.*