

ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

PHYSICAL CHARACTERISTICS AND THEIR STUDY

Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2019. Т. 22, № 3. С. 219—227.
DOI: 10.17073/1609-3577-2019-3-219-227

УДК 621.315.5; 669.2:669.715

Теплоемкость и термодинамические функции алюминиевого проводникового сплава E–AlMgSi (алдрей), легированного галлием

© 2019 г. И. Н. Ганиев^{1,§}, Ф. А. Алиев², Х. О. Одиназода³, А. М. Сафаров¹, Дж. Х. Джайлоев¹

¹ *Институт химии им. В. И. Никитина АН Республики Таджикистан,
ул. Садриддина Айни, д. 299/2, Душанбе, 734063, Таджикистан*

² *Дангаринский государственный университет,
ул. Маркази, д. 25, Дангара, 735320, Таджикистан*

³ *Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими,
ул. Раджабовых, д. 10, Душанбе, 734042, Таджикистан*

Аннотация. Алюминий — металл, сфера применения которого постоянно расширяется. В настоящее время алюминий и его сплавы в ряде областей успешно вытесняют традиционно применяемые металлы и сплавы. Широкое использование алюминия и его сплавов обусловлено в первую очередь такими его свойствами, как малая плотность, высокая коррозионная стойкость и электропроводность, а также возможность нанесения защитных и декоративных покрытий. Все это в сочетании с тем, что запасы алюминия в земной коре велики, а его стоимость относительно невысока и в течение многих лет практически не меняется, постоянно расширяет область его применения. Одним из перспективных направлений использования алюминия является электротехническая промышленность. Так, проводниковый алюминиевый сплав типа E–AlMgSi (алдрей) отличается высокой прочностью и хорошей пластичностью. Этот сплав при соответствующей термической обработке приобретает высокую электропроводность. Изготовленные из него провода используются почти исключительно для воздушных линий электропередач. В работе представлены результаты исследования температурной зависимости теплоемкости, коэффициента теплоотдачи и термодинамических функций алюминиевого сплава E–AlMgSi (алдрей) с галлием. Исследования проведены в режиме «охлаждения». Показано, что с ростом температуры теплоемкость и термодинамические функции сплава E–AlMgSi (алдрей) с галлием увеличиваются, а значение энергии Гиббса уменьшается. Добавки галлия до 1 % (мас.) уменьшают теплоемкость, энтальпию и энтропию исходного сплава и увеличивают величину энергии Гиббса.

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

Введение

Алюминий и его сплавы широко применяют в электротехнике в качестве проводникового и конструкционного материала. Как проводниковый материал алюминий характеризуется высокой электро- и теплопроводностью (после меди макси-

мальный уровень среди всех технически применяемых металлов). Алюминий также отличается малой плотностью, высокой коррозионной стойкостью в атмосферных условиях, а также высокой стойкостью против воздействия химических веществ.

Другим преимуществом алюминия является то, что его отличает нейтральное поведение по от-

Ганиев Изатулло Наврузович^{1,§} — академик АН Республики Таджикистан, доктор хим. наук, профессор кафедры «Технология химических производств», e-mail: ganiev48@mail.ru; **Алиев Фирдавс Алиевич**² — ассистент кафедры «Сельского строительства, гидротехника и геологии», e-mail: firdavs.aliev.2016@mail.ru; **Одиназода Хайдар Одина**³ — чл.-кор. АН Республики Таджикистан, доктор техн. наук, профессор, ректор Таджикского технического университета им. М.С. Осими, e-mail: haydar.odinazoda@mail.ru; **Сафаров Ахрор Мирзоевич**¹ — доктор хим. наук, профессор, директор Института химии В. И. Никитина АН Республики Таджикистан, e-mail: safarov-am@mail.ru; **Джайлоев Джамшед Хусейнович**¹ — старший научный сотрудник, e-mail: husenzod85@mail.ru

§ Автор для переписки

ношению к изоляционным материалам, например к маслам, лакам и термопластам, в том числе при повышенных температурах. Алюминий отличается от других металлов малой магнитной восприимчивостью, а также образованием неэлектропроводного, легко устранимого порошкообразного продукта (Al_2O_3) в электрической дуге [1—3].

Использование алюминия и его сплавов в качестве материала для коммутационных аппаратов, матч линии электропередач, корпусов электродвигателей и выключателей и т.д. регламентируется особыми предписаниями или общими правилами конструирования.

Экономическая целесообразность применения алюминия в качестве проводникового материала объясняется благоприятным соотношением его стоимости и стоимости меди. Кроме того, следует учесть и тот факт, что стоимость алюминия в течение многих лет практически не меняется [4—6].

При использовании проводниковых алюминиевых сплавов для изготовления тонкой проволоки, например обмоточного провода и т. д., могут возникнуть определенные сложности из-за их недостаточной прочности и малого числа перегибов до разрушения.

Одним из путей увеличения прочности алюминиевых проводов является легирование алюминиевых сплавов. Легирующие элементы должны обеспечить рост прочности при достаточно высокой электропроводности. Как правило, примеси повышают прочность алюминия и в то же время понижают его электропроводность. Можно, конечно, выбрать примеси, которые, повышая механические свойства алюминия, мало снижают его проводимость, и ввести их с целью увеличения прочности алюминия.

В последние годы разработаны алюминиевые сплавы, которые даже в мягком состоянии обладают прочностными характеристиками, позволяющими использовать их в качестве проводникового материала [4—6].

Наибольший эффект дает добавка в алюминий кремния. Однако прочность этого сплава в наклепанном состоянии недостаточно высока. Удачное сочетание высокой механической прочности и высокой электропроводности получают, применяя тройные и более сложные по составу алюминиевые сплавы, одновременно содержащие кремний, магний, железа и др. элементы. Подвергая их специальной термической обработке можно достичь желаемого результата. Такие сплавы носят название «алдрей» [1—3].

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

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 ($\text{Al}_6\text{Fe}_2\text{Si}_3$). Поэтому, чтобы обеспечить полностью 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 равна 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 охладить (закалить), то получится пересыщенный раствор Mg_2Si в алюминии [1—3].

При длительном лежании 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].

Схема термической обработки проволоки из сплавов типа алдрея состоит в том, что катаную или прессованную заготовку закаляют в воде при 510—550 °C, затем протягивают и подвергают искусственному старению при 140—180 °C [1—3].

Прочность на разрыв у алдрея вдвое выше, чем у алюминия. При одинаковой проводимости это обеспечивает прочность проводов, из алдрея, в 1,5 раза большую, чем прочность медных проводов при вдвое меньшем весе. Вследствие этого размеры пролетов воздушных линий могут быть увеличены. Большая твердость алдрея уменьшает риск повреждения проводов при монтаже, как это имеет место при алюминии или сталеалюминии.

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

Цель работы — исследование влияния добавок галлия на теплофизические свойства и термодинамические функции алюминиевого проводникового сплава E-AlMgSi (алдрей) химического состава 0,5 % (мас.) Si и 0,5 % (мас.) Mg.

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. Металлический галлий также вводили в расплав в завернутом в алюминиевую фольгу 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 массы 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.

Для определения скорости охлаждения проводили построение кривых охлаждения образцов. Кривые охлаждения представляли собой зависимость температуры образца от времени при охлаждении его на воздухе [7—15].

Передача тепла от более нагретого тела к менее нагретому — это процесс, стремящийся к установлению термодинамического равновесия в системе, которая состоит из огромного числа частиц. Таким образом, это — релаксационный процесс, который можно описать во времени экспонентой. В нашем случае нагретое тело передает свое тепло окружающей среде, т. е. телу с бесконечно большой теплоемкостью. Поэтому температуру окружающей

среды можно считать постоянной (T_0). Тогда закон изменения температуры тела от времени τ можно записать в виде $\Delta T = \Delta T_1 e^{-\tau/\tau_1}$, где ΔT — разность температур нагретого тела и окружающей среды; ΔT_1 — разность температур нагретого тела и окружающей среды при $\tau = 0$; τ_1 — постоянная охлаждения, численно равная времени, в течение которого разность температур между нагретым телом и окружающей средой уменьшается в e раз.

Измерение теплоемкости проводили на установке, схема которой представлено на рис. 1. Электропечь 3 смонтирована на стойке 6, по которой она может перемещаться вверх и вниз. Образец 4 и эталон 5, которые тоже могут перемещаться, представляют собой цилиндры длиной 30 мм и диаметром 16 мм с высверленными каналами с одного конца, в которые вставлены термопары. Концы термопар подведены к многоканальному цифровому термометру Digital Multimeter DI9208L 7. Электропечь 3 запускается через лабораторный автотрансформатор (ЛАТР) 1, после установки нужной температуры с помощью терморегулятора 2. По показаниям многоканального цифрового термометра 7 фиксируется значение начальной температуры. Образец 4 и эталон 5 выдвигаются в электропечь (3) и нагреваются до нужной температуры; температуру контролируют по показанию многоканального цифрового термометра 7 на компьютере 8. Образец 4 и эталон 5 одновременно выдвигаются из электропечи 3, и с этого момента фиксируется температура. Показания многоканального цифрового термометра Digital Multimeter DI9208L 7 записываются на компьютер 8 через каждые 5, 10 и 20 с, до охлаждения температуры образца и эталона.

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. Временной интервал фиксации температуры — 1 с. Относительная

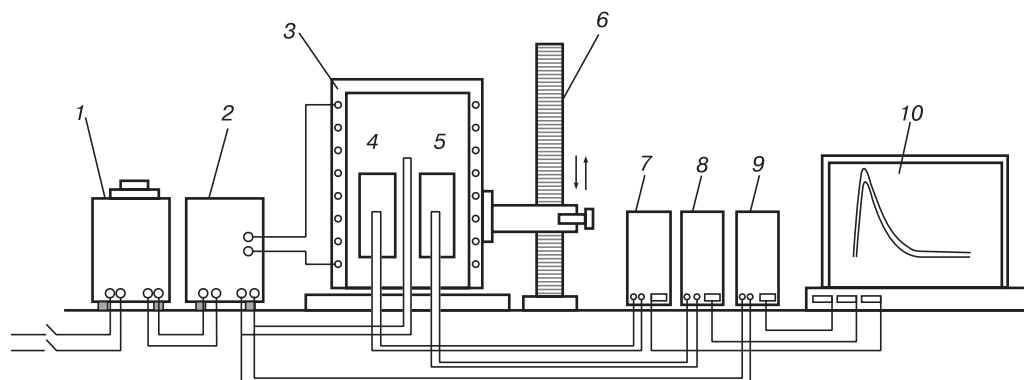


Рис. 1. Установка для определения теплоемкости твердых тел в режиме «охлаждения»:

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

Fig. 1. Solid body «cooling» mode heat capacity measurement unit:

(1) automatic transformer, (2) thermocontroller, (3) electric furnace, (4) sample, (5) standard, (6) electric furnace platform, (7) multichannel digital thermometer and (8) recording device (PC)

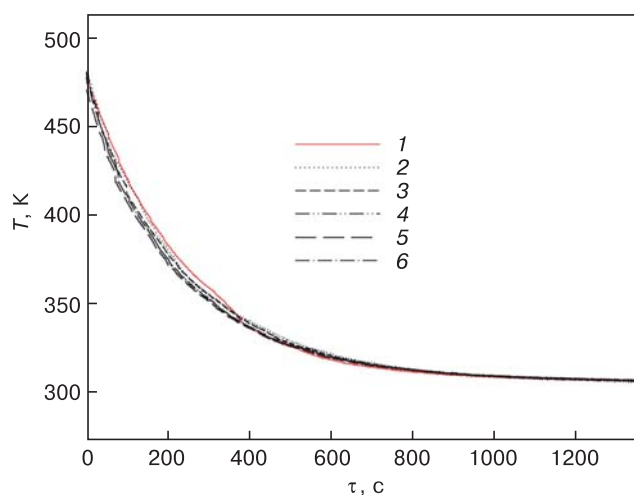


Рис. 2. График зависимости температуры от времени охлаждения для эталона (Al марки A5N) (1) и образцов из сплава E-AlMgSi (алдрей) с различным содержанием галлия (2–6), % (мас.): 2 — 0; 3 — 0,05; 4 — 0,1; 5 — 0,5; 6 — 1,0

Fig. 2. Temperature as a function of cooling time for (1) standard (aluminum Grade A5N) and (2–6) E-AlMgSi (Aldrey) alloy samples with different gallium contents, wt. %: (2) 0, (3) 0.05, (4) 0.1, (5) 0.5 and (6) 1.0

ошибка измерения температуры в интервале от 40 до 400 °C — ± 1 %. Погрешность измерения теплоемкости по предлагаемой методике не превышает 4–6 % в зависимости от температуры.

Обработку результатов измерений проводили с помощью программы MS Excel. Графики строили в программе Sigma Plot. Значение коэффициента корреляции составляло $R_{\text{кор}} > 0,999$, что подтверждает правильность выбора аппроксимирующей функции.

Результаты и их обсуждение

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

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

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

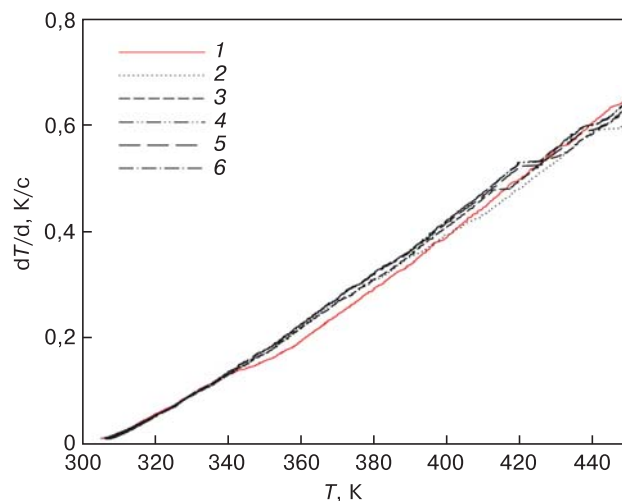


Рис. 3. Температурные зависимости скорости охлаждения для эталона (Al марки A5N) (1) и образцов из сплава E-AlMgSi (алдрей) с различным содержанием галлия (2–6), % (мас.): 2 — 0; 3 — 0,05; 4 — 0,1; 5 — 0,5; 6 — 1,0

Fig. 3. Temperature dependences of cooling rate for (1) standard (aluminum Grade A5N) and (2–6) E-AlMgSi (Aldrey) alloy samples with different gallium contents, wt. %: (2) 0, (3) 0.05, (4) 0.1, (5) 0.5 and (6) 1.0

Дифференцируя уравнение (1) по τ получаем уравнение для 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 галлием, которые приставлены на рис. 3. Значения коэффициентов a, b, p, k, ab, pk в уравнении (2) для исследованных сплавов приведены в табл. 1.

Далее по рассчитанным значениям скорости охлаждения сплавов по уравнению (3) была вычислена удельная теплоемкость сплава E-AlMgSi (алдрей), легированного галлием, и эталона (Al марки A5N):

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

Таблица 1

Значения коэффициентов a, b, p, k, ab, pk в уравнение (2) для сплава E-AlMgSi (алдрей), легированного галлием [The values of the coefficients a, b, p, k, ab, pk in equation (2) for the gallium-doped alloy E-AlMgSi (Aldrey)]

Содержание галлия в сплаве E-AlMgSi (алдрей), % (мас.)	a, K	$b \cdot 10^{-3}, c^{-1}$	p, K	$k \cdot 10^{-5}, c^{-1}$	$ab \cdot 10^{-1}, K/c$	$pk \cdot 10^{-3}, K/c$
0	165,61	4,46	314,72	2,27	7,38	7,14
0,05	172,18	4,55	314,99	2,20	7,83	6,92
0,1	159,14	4,71	314,85	2,02	7,49	6,35
0,5	153,82	4,64	313,99	1,81	7,13	5,67
1,0	159,234	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

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 сплавов и эталона при данной температуре.

Проводя полиномильную регрессию, было получено уравнение для температурной зависимости удельной теплоемкости сплава E–AlMgSi (алдрей), легированного галлием:

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

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

Результаты расчета теплоемкости сплавов по формуле (3) для разных значений температуры представлены в табл. 3. Теплоемкость сплавов с ростом концентрации галлия в сплаве E–AlMgSi (алдрей) и температуры увеличивается. Используя значения удельной теплоемкости сплава E–AlMgSi (алдрей), легированного галлием, и экспериментально полученные значения скорости охлаждения, вычислили температурную зависимость коэффициента

теплоотдачи сплава E–AlMgSi (алдрей) по 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. Температурные зависимости коэффициента теплоотдачи для сплава E–AlMgSi (алдрей), легированного галлием, представлены на рис. 4.

Для расчета температурной зависимости изменений энтальпии H , энтропии S и энергии Гиббса G были использованы интегралы от удельной теплоемкости (см. уравнение (4)):

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

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

Таблица 2

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

Содержание галлия в сплаве E–AlMgSi (алдрей), % (мас.)	a , Дж/(кг · К)	b , Дж/(кг · К ²)	c , Дж/(кг · К ³)	d , Дж/(кг · К ⁴)	R , %
0	–10394,96	84,30	0,21	1,71	0,9925
0,05	–10394,96	82,90	–0,20	1,66	0,9899
0,1	–13788,22	106,85	–0,26	2,11	0,9950
0,5	–19463,50	152,21	–0,38	3,15	0,9980
1,0	–10147,32	78,49	–0,19	1,51	0,9989
Эталон (Al марки A5N)	645,88	0,36	0	0	1,0

R — коэффициент корреляции.

Таблица 3

Температурная зависимость удельной теплоемкости (кДж/(кг · К)) сплава E–AlMgSi (алдрей), легированного галлием и эталона (Al марки A5N) [Temperature dependence of the specific heat capacity (kJ/kg · K) of an E–AlMgSi alloy (Aldrey) doped with gallium and a standard (A5N grade Al)]

Содержание галлия в сплаве E–AlMgSi (алдрей), % (мас.)	$C_{P_0}^0$, кДж/(кг · К)					
	300 К	325 К	350 К	375 К	400 К	450 К
0	751,00	855,36	907,62	923,83	920,00	916,37
0,05	678,55	794,12	858,13	886,15	893,72	909,80
0,1	574,54	731,23	820,21	861,25	874,13	894,55
0,5	531,77	712,59	802,69	831,60	828,86	846,53
1,0	531,62	658,39	733,81	772,05	787,26	805,20
Эталон (Al марки A5N)	854,62	877,90	901,55	925,45	949,48	997,46

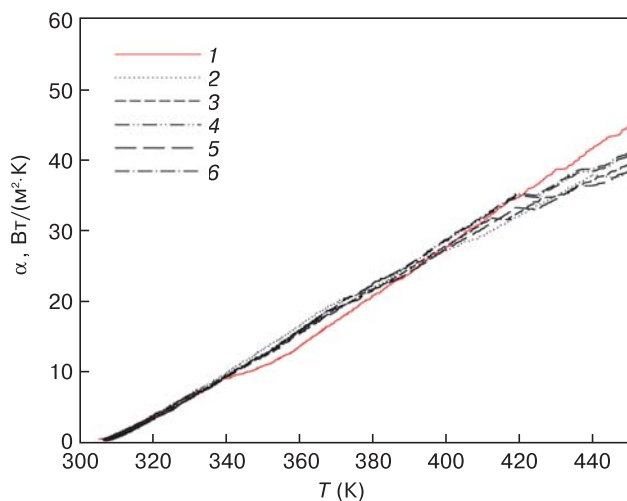


Рис. 4. Температурная зависимость коэффициента теплоотдачи для эталона (Al марки А5N) (1) и образцов из сплава E-AlMgSi (алдрей) с различным содержанием галлия (2—6), % (мас.): 2 — 0; 3 — 0,05; 4 — 0,1; 5 — 0,5; 6 — 1,0

Fig. 4. Temperature dependences of heat conductivity coefficient for (1) standard (aluminum Grade A5N) and (2—6) E-AlMgSi (Aldrey) alloy samples with different gallium contents, wt.%: (2) 0, (3) 0.05, (4) 0.1, (5) 0.5 and (6) 1.0

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

где $T_0 = 298,15$ К.

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

Увеличение теплоемкости, энтальпии и энтропии сплава E-AlMgSi (алдрей) при легировании его галлием можно объяснить ростом степени гетерогенности структуры сплавов [16—18]. Как видно из рис. 5, г и д, в микроструктуре сплава E-AlMgSi (алдрей), содержащего 0,5 и 1,0 % (мас.) галлия, не наблюдаются первичные выделения фазы Mg_2Si . В исходном сплаве (рис. 5, а) и малолегированных галлием сплавах (рис. 5, б и в) выделения фазы Mg_2Si кристаллизуются в игольчатом виде на фоне твердого раствора алюминия.

Таблица 4

Температурные зависимости изменений термодинамических функций сплава E-AlMgSi (алдрей), легированного галлием и эталона (Al марки А5N)

[Temperature dependence of the change in the thermodynamic functions of the E-AlMgSi alloy (Aldrey) doped with gallium and the standard (A5N grade Al)]

Содержание галлия в сплаве E-AlMgSi (алдрей), % (мас.)	Термодинамические функции					
	300 К	325 К	350 К	375 К	400 К	450 К
$[H^0(T) - H^0(T_0^*)]$, кДж/кг для сплавов						
0	1,3799	21,5847	43,7138	66,6654	89,7383	135,4471
0,05	1,2451	19,7762	40,5196	62,3809	84,6546	129,5626
0,1	1,1125	18,4786	38,9238	60,9993	83,7508	129,9372
0,5	0,9674	16,7417	35,8409	56,3663	77,1572	118,5852
1,0	0,9726	15,9695	33,4642	52,3503	71,8750	111,5986
Эталон (Al марки А5N)	1,5795	23,2351	45,4777	68,3149	91,7514	140,4266
$[S^0(T) - S^0(T_0^*)]$, кДж/(кг · К) для сплавов						
0	0,0046	0,0692	0,1348	0,1982	0,2577	0,3654
0,05	0,0042	0,0634	0,1248	0,1852	0,2427	0,3484
0,1	0,0037	0,0592	0,1198	0,1807	0,2394	0,3482
0,5	0,0033	0,0536	0,1102	0,1669	0,2205	0,3181
1,0	0,0033	0,0512	0,1030	0,1551	0,2055	0,2991
Эталон (Al марки А5N)	0,0053	0,0746	0,1405	0,2035	0,2640	0,3786
$[G^0(T) - G^0(T_0^*)]$, кДж/кг для сплавов						
0	-0,0043	-0,9209	-3,4739	-7,6429	-13,3499	-28,9837
0,05	-0,0038	-0,8394	-3,1931	-7,0741	-12,4299	-27,2549
0,1	-0,0034	-0,7732	-3,0065	-6,7655	-12,0232	-26,7576
0,5	-0,0031	-0,6922	-2,7354	-6,2028	-11,0526	-24,5595
1,0	-0,0030	-0,6705	-2,5947	-5,8237	-10,3367	-22,9901
Эталон (Al марки А5N)	-0,0049	-1,0111	-3,7068	-8,0133	-13,8629	-29,9625

* $T_0 = 298,15$ К.

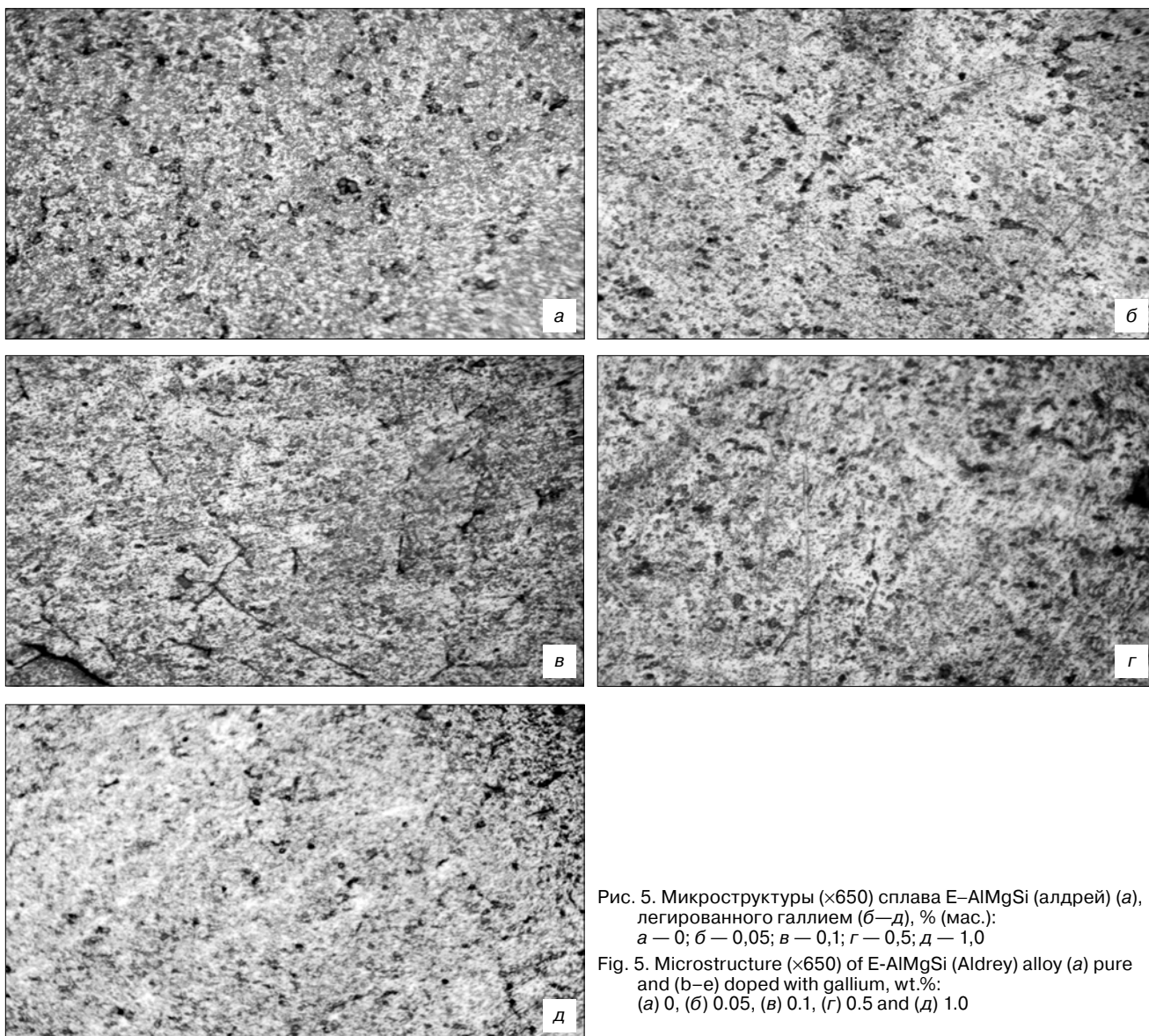


Рис. 5. Микроструктуры ($\times 650$) сплава E-AlMgSi (алдрей) (а), легированного галлием (б–д), % (мас.): а – 0; б – 0,05; в – 0,1; г – 0,5; д – 1,0

Fig. 5. Microstructure ($\times 650$) of E-AlMgSi (Aldrey) alloy (a) pure and (b–e) doped with gallium, wt. %: (a) 0, (б) 0.05, (в) 0.1, (г) 0.5 and (д) 1.0

Закключение

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

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.–Л.: Госэнергоиздат, 1957. 184 с.
2. Алюминиевые сплавы: свойства, обработка, применение / Отв. ред. Л. Х. Райтбарга. 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. Фридляндера. М.: Металлургия, 1984. 528 с.
4. Белецкий В. М., Кривов Г. А. Алюминиевые сплавы (Состав, свойства, технология, применение) / Под ред. И. Н. Фридляндера. Киев: 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, N 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. ун-т, 2013. 81 с.
7. Ниезов Х. Х., Ганиев И. Н., Бердиев А. Э. Сплавы особо чистого алюминия с редкоземельными металлами: монография. Душанбе: ООО «Сармад компания», 2017. 146 с.
8. 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
9. Ganiev I. N., Mulloeva N. M., Nizomov Z., Obidov F. U., Ibragimov N. F. Temperature dependence of the specific heat and thermo-

dynamic functions of alloys of the Pb–Ca system // High Temperature. 2014. V. 52, Iss. 1. P. 138–140. DOI: 10.1134/s0018151x1401009x

10. Ганиев И. Н., Муллоева Н. М., Низомов З. А., Махмадуллоев Х. А. Теплофизические свойства и термодинамические функции сплавов системы Pb–Sr // Известия Самарского научно центра Российской Академии наук. 2014. Т. 6, № 6. С. 38–42. URL: http://www.ssc.smr.ru/media/journals/izvestia/2014/2014_6_38_42.pdf

11. Иброхимов Н. Ф., Ганиев И. Н., Низомов З., Ганиева Н. И., Иброхимов С. Ж. Влияние церия на теплофизические свойства сплава AMr2 // Физика металлов и металловедение. 2016. Т. 117, № 1. С. 53–57. DOI: 10.7868/S001532301601006X

12. 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.

13. Иброхимов С. Ж., Эшов Б. Б., Ганиев И. Н., Иброхимов Н. Ф. Влияние скандия на физико-химические свойства

сплава AMr4 // Известия Самарского научного центра Российской Академии наук. 2014. Т. 16, № 4. С. 256–260. URL: http://www.ssc.smr.ru/media/journals/izvestia/2014/2014_4_256_260.pdf

14. Низомов З., Гулов Б. Н., Ганиев И. Н., Саидов Р. Х., Обидов Ф. У., Эшов Б. Б. Исследование температурной зависимости удельной теплоемкости алюминия марок ОСЧ и А7 // Доклады АН Республики Таджикистан. 2011. Т. 54, № 1. С. 53–59.

15. 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

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 15 августа 2019 г.

Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = *Materials of Electronics Engineering*. 2019, vol. 22, no. 3, pp. 219–227. DOI: 10.17073/1609-3577-2019-3-219-227

Heat capacity and thermodynamic functions of aluminum conductive alloy E–AlMgSi (Aldrey) doped with gallium

I. N. Ganiev^{1,§}, F. A. Aliev², H. O. Odinzoda³, A. M. Safarov¹, J. H. Jayloev¹

¹ V. I. Nikitin Institute of Chemistry, Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan, 299/2 Sadridin Ayni Str., Dushanbe 734063, Tajikistan

² Dangarinsk State University, 25 Markazi Str., Dangara 735320, Tajikistan

³ Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi, 10 Radjabovs Str., Dushanbe 734042, Tajikistan

Abstract. Aluminum — a metal whose scope of application is constantly expanding. At present, aluminum and its alloys in a number of areas successfully displace traditionally used metals and alloys. The widespread use of aluminum and its alloys is due to its properties, among which, first of all, low density, satisfactory corrosion resistance and electrical conductivity, ability to apply protective and decorative coatings should be mentioned. All this, combined with the large reserves of aluminum in the earth's crust, makes the production and consumption of aluminum very promising. One of the promising areas for the use of aluminum is the electrical industry. Conductive aluminum alloys type E–AlMgSi (Aldrey) are representatives of this group of alloys.

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 gallium. Research conducted in the “cooling” mode. It is shown that the temperature capacity and thermodynamic functions of the E–AlMgSi alloy (Aldrey) with gallium increase, while the Gibbs energy decreases. Gallium additives up to 1 wt.% Reduce the heat capacity, enthalpy, and entropy of the initial alloy and increase the Gibbs energy.

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

Information about authors:

Izatullo N. Ganiev^{1,§}: Academician of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan, Dr. Sci. (Chem.), Professor of the Department Technology of Chemical Production (ganiev48@mail.ru); **Firdavs A. Aliev²:** Assistant of the Department of Rural Construction, Hydrotechnics and Geology (firdavs.aliev.2016@mail.ru); **Haydar O. Odinzoda³:** Corresponding Member Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Rector of the Tajik Technical University named after M.S. Osimi (haydar.odinzoda@mail.ru); **Ahror M. Safarov¹:** Dr. Sci. (Chem.), Professor, Director of the Institute of Chemistry V.I. Nikitina, Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan (safarov-am@mail.ru); **Jamshed H. Jayloev¹:** Senior Researcher (husenzod85@mail.ru)

§ Corresponding author

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. *Alyuminievye 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 alyuminievye splavy: Spravochnik* [Industrial aluminum alloys: Handbook]. Moscow: Metallurgy, 1984, 528 p. (In Russ.)
4. 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.)
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. *Alyuminii i ego splavy* [Aluminum and its alloys]. Samara: Samara State Technical University, 2013, 81 p. (In Russ.)
7. Niezov Kh. Kh., Ganiev I. N., Berdiev A. E. *Splavy osobochistogo alyuminiya s redkozemel'nymi metallami* [Alloys high purity aluminium with rare-earth metals]. Dushanbe: Sarmad kompaniya, 2017, 146 p. (In Russ.)
8. 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 vuzov. Izvestiya vuzov. 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
9. Ganiev I. N., Mulloeva N. M., Nizomov Z., Obidov F. U., Ibragimov N. F. Temperature dependence of the specific heat and thermodynamic functions of alloys of the Pb—Ca system. *High Temperature*, 2014, vol. 52, no. 1, pp. 138—140. DOI: 10.1134/s0018151x1401009x
10. Ganiev I. N., Mulloeva N. M., Nizomov Z. A., Makhmaduloev 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. 6, no. 6, pp. 38—42. (In Russ.). URL: http://www.ssc.smr.ru/media/journals/izvestia/2014/2014_6_38_42.pdf
11. 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
12. 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 AlFe5Si10. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta = Bulletin of the Technological University*, 2018, vol. 21, no. 8, pp. 11—15. (In Russ.).
13. Ibrohimov S. Zh., Eshov B. B., Ganiev I. N., Ibrohimov N. F. Influence scandium on the physicochemical properties of the alloy AMg4. *Izvestiya Samarskogo nauchno tsentra Rossiiskoi Akademii nauk = Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2014, vol. 16, no. 4, pp. 256—260. (In Russ.). URL: http://www.ssc.smr.ru/media/journals/izvestia/2014/2014_4_256_260.pdf
14. Nizomov Z., Gulov B., Ganiev I. N., Saidov R. H., Obidov F. U., Eshov B. B. Research of temperature dependence special heat capacity of aluminium special cleanliness and A7. *Doklady AN Respubliki Tadjikistan = Reports of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan*, 2011, vol. 54, no. 1, pp. 53—59. (In Russ.)
15. 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
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., Makhmaduloev H. A., Ganiev I. N., Khakhdodov M. M. Barium: a new inoculant for silumins. *Liteinoe proizvodstvo = Foundry. Technologies and Equipment*, 2001, no. 10, pp. 6—9. (In Russ.)

Received August 15, 2019