

Ганиев И.Н., Зокиров Ф.Ш., Шарипова Х.Я., Иброхимов Н.Ф. Влияние таллия на кинетику окисления алюминиевого сплава АМg2 в твердом состоянии // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2021. – Т. 23, № 2. – С. 36–42. DOI: 10.15593/2224-9877/2021.2.05

Ganiev I.N., Zokirov F.Sh., Sharipova H.Ya., Ibrokhimov N.F. Influence of thallium on the kinetics of oxidation of aluminum alloy AMg2 in the solid state. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2021, vol. 23, no. 1, pp. 36–42. DOI: 10.15593/2224-9877/2021.2.05

ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение

Т. 23, № 2, 2021

Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science

<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

DOI: 10.15593/2224-9877/2021.2.05

УДК 669.715:541.127

И.Н. Ганиев¹, Ф.Ш. Зокиров², Х.Я. Шарипова³, Н.Ф. Иброхимов²

¹Институт химии им. В.Н. Никитина Национальной академии наук Таджикистана, Душанбе, Таджикистан

²Таджикский технический университет им. академика М.С. Осими, Душанбе, Таджикистан

³Хатлонский государственный медицинский университет, Дангара, Таджикистан

ВЛИЯНИЕ ТАЛЛИЯ НА КИНЕТИКУ ОКИСЛЕНИЯ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АМГ2 В ТВЕРДОМ СОСТОЯНИИ

Окисление металлов и сплавов изучают в связи с тем, что они играют важную роль в различных областях техники, тем не менее информации подобного рода недостаточно. Поскольку чистые металлы редко используются в качестве конструкционных материалов, вопросы окисления сплавов, особенно методы повышения их сопротивления окислению, являются с прикладной точки зрения наиболее важными аспектами высокотемпературного окисления сплавов. Повышенный интерес исследователей и производителей к алюминий-магний-сплавам связан с их широким использованием в промышленности. Однако разработка таких сплавов неразрывно связана с проблемой их окисления. В литературе имеются ограниченные сведения о влиянии третьего компонента на окисляемость алюминий-магний-сплавов. Процесс окисления сплавов исследовался на воздухе в изотермических условиях термогравиметрическим методом с непрерывной фиксацией массы образца в течение часа при значениях температуры 773, 823 и 873 К. На основании экспериментальных данных строились кинетические кривые окисления и определялись величины удельного увеличения массы в зависимости от количества таллия в сплаве АМg2, времени и температуры. Показано, что добавки таллия и повышение температуры увеличивают скорость окисления исходного сплава в твердом состоянии. Кажущаяся энергия активации процесса окисления алюминиевого сплава АМg2 составляет 100 кДж/моль и уменьшается до 47,90 кДж/моль для сплава с 1,0 мас. % таллия. Кривые окисления алюминиевого сплава АМg2 с таллием в твердом состоянии описываются полиномами, свидетельствующими о гиперболическом механизме данного процесса.

Ключевые слова: алюминий-магний-сплав АМГ2, таллий, термогравиметрический метод, твердое состояние, кинетика окисления, истинная скорость окисления, энергия активации окисления, изохронны окисления, механизм окисления, сплав.

I.N. Ganiev¹, F.Sh. Zokirov², H.Ya. Sharipova³, N.F. Ibrokhimov²

¹Institute of Chemistry named after V.I. Nikitin of the National Academy of Sciences of Tajikistan, Dushanbe, Tajikistan

²Tajik Technical University named after academician M.S. Osimi, Dushanbe, Tajikistan

³Khatlon State Medical University, Dangara, Tajikistan

INFLUENCE OF TALLIUM ON THE KINETICS OF OXIDATION OF ALUMINUM ALLOY AMG2 IN THE SOLID STATE

Oxidation of metals and alloys is studied due to the fact that they play an important role in various fields of technology, however, information of this kind is insufficient. Since pure metals are rarely used as structural materials, the issues of oxidation of alloys, especially methods of increasing their resistance to oxidation, are, from an applied point of view, the most important aspects of high-temperature oxidation of alloys. The increased interest of researchers and manufacturers in aluminum-magnesium alloys is associated with their widespread use in industry. However, the development of such alloys is inextricably linked to the problem of their oxidation. There is limited information in the literature on the effect of the third component on the oxidizability of aluminum-magnesium alloys. The oxidation process of the alloys was investigated in air under isothermal conditions by the thermogravimetric method with continuous fixation of the sample mass for an hour at temperatures of 773K, 823K and 873K. On the basis of the experimental data, kinetic curves of oxidation were constructed and the values of the specific increase in mass from the amount of thallium in the AMg2 alloy, time and temperature were determined. It is shown that thallium additions and an increase in temperature increase the rate of oxidation of the initial alloy in the solid state. The apparent activation energy of the oxidation process of the aluminum alloy AMg2 is 100 kJ/mol and decreases to 47.90 kJ/mol for the alloy with 1.0 wt% thallium. The oxidation curves of the AMg2 aluminum alloy with thallium in the solid state are described by polynomials indicating the hyperbolic mechanism of this process.

Keywords: aluminum alloy AMG2, thallium, thermogravimetric method, solid state, oxidation kinetics, true oxidation rate, activation energy of oxidation, isochrones of oxidation, oxidation mechanism, alloy.

Для сплавов системы Al–Mg характерно сочетание удовлетворительной прочности, хорошей пластичности, свариваемости и коррозионной стойкости. Кроме того, эти сплавы отличаются высокой усталостной прочностью.

В сплавах этой системы, содержащих до 6 % Mg, образуется эвтектическая смесь с участием фазы Al_3Mg_2 и твердого раствора магния в алюминии. Наиболее широкое распространение в промышленности получили сплавы с содержанием магния от 1 до 5 %. Рост содержания магния в сплаве существенно увеличивает его прочность и предел текучести. При этом относительное удлинение уменьшается незначительно [1].

Сплавы с содержанием магния до 3 мас. % не изменяют кристаллическую структуру при комнатной и повышенной температуре, даже в существенно нагретом состоянии. С ростом концентрации магния в сплаве в нагретом состоянии механическая структура сплава становится нестабильной. Кроме того, увеличение содержания магния свыше 6 % приводит к ухудшению коррозионной стойкости сплава. В сплавах с высоким содержанием магния существует тенденция к образованию интерметаллидной фазы Mg_5Al_8 по границам зерен и в областях локализованной деформации внутри микроструктуры [2].

Для улучшения прочностных характеристик сплавы системы Al–Mg легируют хромом, марганцем, титаном, кремнием или ванадием. Примеси меди и железа в сплавах этой системы нежелательны, поскольку они снижают их коррозионную стойкость и свариваемость. Сплавы можно применять во многих конструкциях, подверженных суrowым атмосферным воздействиям, например в облицовочных панелях зданий, особенно в судостроении и конструкциях в прибрежных районах и в открытом море, включая нефтяные платформы. Сварные алюминиевые лодки и катера изготавливают исключительно из сплавов этой серии. В автомобилестроении из этих сплавов изготавливают штампованные детали корпуса и шасси благодаря хорошей комбинации прочности и формоупругости [2, 3].

Влияние добавок элементов подгруппы галлия на различные свойства алюминиево-бериллиевого сплава АБ1 исследовано авторами работ [4–8].

Цель данной работы заключается в исследовании влияния добавок таллия и температуры на кинетику окисления алюминиевого сплава АМг2 в твердом состоянии.

Для изучения кинетики окисления алюминиевого сплава АМг2 с таллием нами использовался термогравиметрический метод, основанный на не-

прерывном взвешивании образца, который обычно применяется при изучении высокотемпературной коррозии твердых металлов [9–17].

Материалы и методики эксперимента

Для получения сплавов были использованы алюминий марки А85 (ГОСТ 11069–2001), магниевый металлический марки Мг90 (ГОСТ 804–93) и таллий металлический марки Тл (ГОСТ 18337–95). Сплавы алюминия с 2,0 мас. % магния были получены в вакуумной печи сопротивления типа СНВ-1.1/16ИЗ. Легирование алюминиевого сплава АМг2 таллием осуществляли в открытых шахтных печах типа СШОЛ под слоем флюса.

Исследование процесса окисления сплавов проводили методом термогравиметрии, который основан на непрерывном взвешивании образцов. Для проведения исследований была собрана установка, принцип работы которой описан ранее в работах [18–27]. Тигель с исследуемым металлом помещался в изотермической зоне печи. Температуру повышали со скоростью 2–3 °С/мин. Перед разогревом печи катетометр настраивали на указатель пружины, записывали на шкале точки отсчета и в течение нагрева контролировали изменение массы образца. При достижении заданного режима записывали новую точку отсчета.

Результаты исследования и их обсуждение

Для исследования кинетики окисления алюминиевого сплава АМг2, легированного таллием, была синтезирована серия сплавов с содержанием таллия 0,01; 0,05; 0,1; 0,5; 1,0 мас. %. Кинетические и энергетические параметры процесса окисления сплавов приведены на рис. 1–4 и в табл. 1, 2.

Характер кинетических кривых окисления исходного алюминиевого сплава АМг2 показывает, что окисление на начальных стадиях протекает интенсивно, о чем свидетельствует рост величины удельной массы образцов (см. рис. 1, а). Истинная скорость окисления алюминиевого сплава АМг2 в зависимости от температуры изменяется в пределах от $1,02 \cdot 10^{-4}$ до $1,53 \cdot 10^{-4}$ кг·м⁻²·с⁻¹ при 773 и 873 К соответственно. Кажущаяся энергия активации процесса окисления данного сплава, вычисленная по тангенсу угла наклона прямой зависимости $\lg K - 1/T$, составляет 100,00 кДж/моль (см. табл. 1).

Окисление сплава АМг2, содержащего 0,01 мас. % таллия, в твердом состоянии проводили при значениях температуры 773, 823 и 873 К. Кинетические кривые окисления сплава приведены на рис. 1, б. Скорость окисления сплава в зависимости от времени и температуры увеличивается.

Однако рост величины удельной массы образца к 20-й минуте приобретает значение, равное $14,45 \cdot 10^{-2} \text{ кг/м}^2$ при 873 К. Далее рост удельной массы образцов замедляется и даже к 50-й минуте не становится постоянным. Кажущаяся энергия активации процесса окисления составляет 95,80 кДж/моль (см. табл. 1).

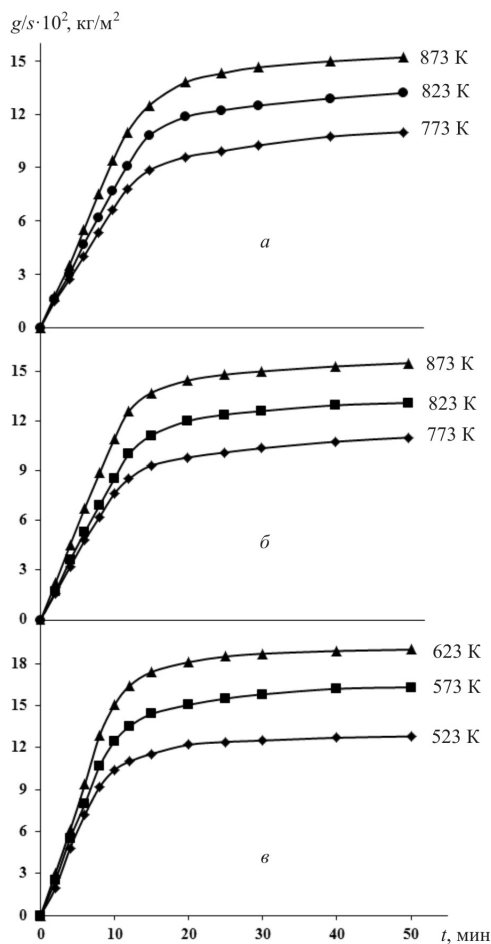


Рис. 1. Кинетические кривые окисления алюминиевого сплава АМг2 (а) с таллием, мас. %: 0,01(б); 1,0(в)

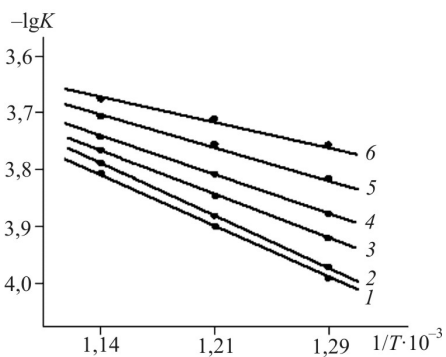


Рис. 2. Зависимость $\lg K$ от $1/T$ для алюминиевого сплава АМг2 (1) с таллием, мас. %: 0,01 (2); 0,05 (3); 0,1 (4); 0,5 (5); 1,0 (6)

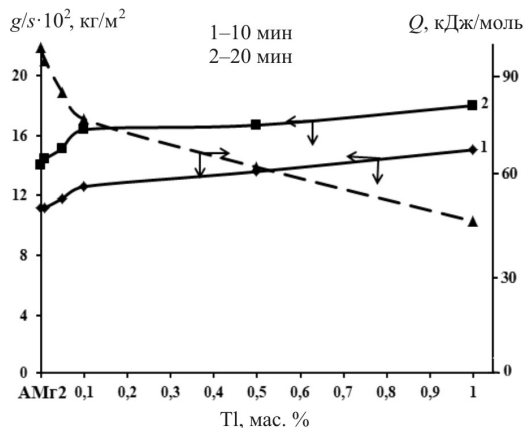


Рис. 3. Изохронны окисления алюминиевого сплава АМг2 с таллием при 873 К

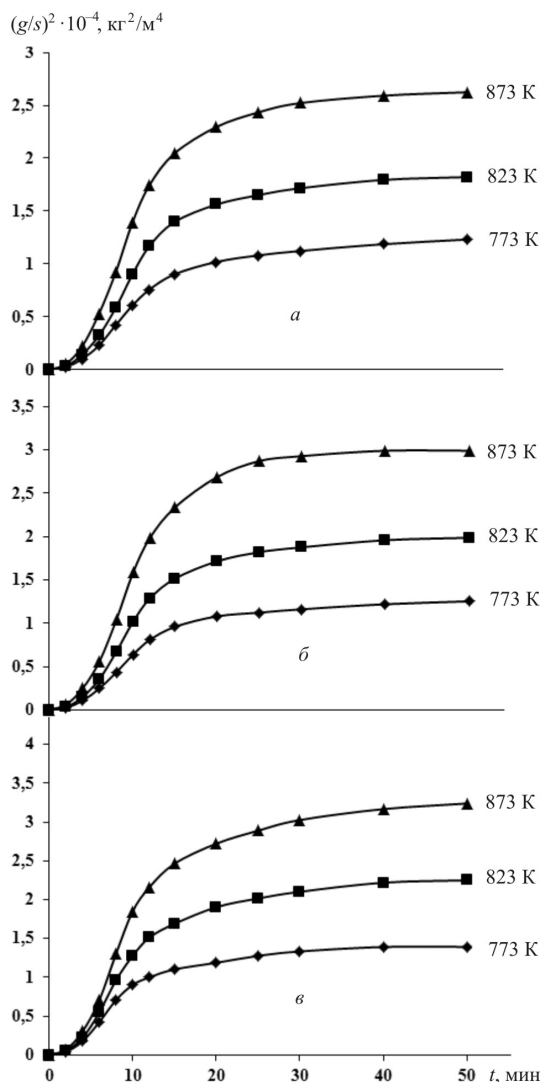


Рис. 4. Квадратичные кинетические кривые окисления алюминиевого сплава АМг2, легированного таллием, мас. %: 0,05 (а); 0,1 (б); 0,5 (в)

Таблица 1

Кинетические и энергетические параметры процесса окисления алюминиевого сплава АМг2 с таллием в твердом состоянии

Содержание таллия в сплаве, мас. %	Температура окисления, К	Истинная скорость окисления $K \cdot 10^4, \text{кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	Кажущаяся энергия активации окисления, кДж/моль
0,0	773	1,02	100,00
	823	1,22	
	873	1,53	
0,01	773	1,04	95,80
	823	1,32	
	873	1,59	
0,05	773	1,19	87,09
	823	1,41	
	873	1,69	
0,1	773	1,34	76,64
	823	1,52	
	873	1,75	
0,5	773	1,51	61,80
	823	1,76	
	873	1,91	
1,0	773	1,73	47,90
	823	1,88	
	873	2,05	

Таблица 2

Результаты математической обработки квадратичных кинетических кривых окисления алюминиевого сплава АМг2, легированного таллием, в твердом состоянии

Содержание таллия в сплаве, мас. %	Температура окисления, К	Полиномы квадратичных кинетических кривых окисления сплавов	Коэффициент регрессии R
0,0	773	$y^* = -10^{-7}x^5 + 2 \cdot 10^{-5}x^4 - 7 \cdot 10^{-4}x^3 + 0,0126x^2 - 0,0234x^{**}$	0,998
	823	$y = -2 \cdot 10^{-7}x^5 + 2 \cdot 10^{-5}x^4 - 1,1 \cdot 10^{-3}x^3 + 0,0192x^2 - 0,0443x$	0,998
	873	$y = -2 \cdot 10^{-7}x^5 + 3 \cdot 10^{-5}x^4 - 1,4 \cdot 10^{-3}x^3 + 0,0256x^2 - 0,0528x$	0,999
0,01	773	$y = -10^{-7}x^5 + 2 \cdot 10^{-5}x^4 - 8 \cdot 10^{-4}x^3 + 0,0125x^2 - 0,009x$	0,996
	823	$y = -2 \cdot 10^{-7}x^5 + 3 \cdot 10^{-5}x^4 - 1,1 \cdot 10^{-3}x^3 + 0,0195x^2 - 0,0311x$	0,998
	873	$y = -3 \cdot 10^{-7}x^5 + 4 \cdot 10^{-5}x^4 - 1,8 \cdot 10^{-3}x^3 + 0,0297x^2 - 0,0374x$	0,996
0,05	773	$y = -10^{-7}x^5 + 2 \cdot 10^{-5}x^4 - 8 \cdot 10^{-4}x^3 + 0,0132x^2 - 0,0099x$	0,997
	823	$y = -2 \cdot 10^{-7}x^5 + 3 \cdot 10^{-5}x^4 - 1,3 \cdot 10^{-3}x^3 + 0,0222x^2 - 0,0289x$	0,996
	873	$y = -3 \cdot 10^{-7}x^5 + 4 \cdot 10^{-5}x^4 - 1,9 \cdot 10^{-3}x^3 + 0,0303x^2 - 0,025x$	0,996
0,1	773	$y = -2 \cdot 10^{-7}x^5 + 2 \cdot 10^{-5}x^4 - 9 \cdot 10^{-4}x^3 + 0,0146x^2 - 0,0134x$	0,997
	823	$y = -3 \cdot 10^{-7}x^5 + 3 \cdot 10^{-5}x^4 - 1,5 \cdot 10^{-3}x^3 + 0,024x^2 - 0,0286x$	0,996
	873	$y = -4 \cdot 10^{-7}x^5 + 5 \cdot 10^{-5}x^4 - 2,2 \cdot 10^{-3}x^3 + 0,0357x^2 - 0,0373x$	0,996
0,5	773	$y = -2 \cdot 10^{-7}x^5 + 2 \cdot 10^{-5}x^4 - 8 \cdot 10^{-4}x^3 + 0,0106x^2 + 0,0354x$	0,986
	823	$y = -3 \cdot 10^{-7}x^5 + 3 \cdot 10^{-5}x^4 - 1,4 \cdot 10^{-3}x^3 + 0,0211x^2 + 0,0166x$	0,993
	873	$y = -4 \cdot 10^{-7}x^5 + 5 \cdot 10^{-5}x^4 - 2,2 \cdot 10^{-3}x^3 + 0,0333x^2 + 0,0033x$	0,992
1,0	773	$y = -2 \cdot 10^{-7}x^5 + 2 \cdot 10^{-5}x^4 - 10^{-3}x^3 + 0,0138x^2 + 0,0379x$	0,997
	823	$y = -3 \cdot 10^{-7}x^5 + 4 \cdot 10^{-5}x^4 - 1,7 \cdot 10^{-3}x^3 + 0,0258x^2 + 0,0194x$	0,993
	873	$y = -5 \cdot 10^{-7}x^5 + 6 \cdot 10^{-5}x^4 - 2,7 \cdot 10^{-3}x^3 + 0,0417x^2 + 0,0061x$	0,991

Примечание: y^* – удельное увеличение массы образцов из сплавов (g/s); x^{**} – продолжительность времени окисления (мин).

Легирование алюминиевого сплава АМг2 1,0 мас. % таллия способствует некоторому увеличению истинной скорости окисления (см. рис. 1, в) и, соответственно, уменьшению величины кажущейся энергии активации окисления, по сравнению со сплавом, содержащим 0,01 мас. % таллия. Так,

если при значениях температуры 773 и 873 К значение истинной скорости окисления сплава, содержащего 0,01 мас. % таллия, изменяется от $1,04 \cdot 10^{-4}$ до $1,59 \cdot 10^{-4} \text{кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ с энергией активации $95,80 \text{кДж/моль}$, то при этих же значениях температуры скорость окисления алюминиевого сплава

АМg2, содержащего 1,0 мас. % таллия, характеризуется величинами $1,73 \cdot 10^{-4}$; $2,05 \cdot 10^{-4}$ кг·м⁻²·с⁻¹ и при этом значение кажущейся энергии активации составляет 47,90 кДж/моль соответственно (см. табл. 1).

Приведенная на рис. 2 зависимость $\lg K-1/T$ для алюминиевого сплава АМg2 с таллием показывает, что с ростом температуры и содержания таллия скорость окисления сплавов растет.

При окислении сплавов наблюдается медленное, но плавное нарастание толщины оксидной пленки, которое после 20 мин замедляется, но не полностью предотвращает процесс окисления. По мере роста толщины оксидной пленки скорость процесса окисления затормаживается, а с увеличением температуры растет. Добавки таллия в пределах 0,01–0,05 мас. % незначительно влияют на окисляемость алюминиевого сплава АМg2. Дальнейшее увеличение концентрации таллия в сплаве до 1,0 мас. % повышает скорость окисления исходного сплава АМg2 (см. рис. 3).

На рис. 4 представлены квадратичные кинетические кривые окисления сплава АМg2 с таллием. В табл. 2 приведены результаты обработки квадратичных кинетических кривых окисления сплавов в виде зависимости $(g/s)^2-t$ для алюминиевого сплава АМg2, содержащего 0,01–1,0 мас. % таллия. Следует заключить, что характер окисления сплавов подчиняется гиперболической зависимости $y = kx^n$, где значение n изменяется от 1 до 5 (см. табл. 2).

Заключение

Как известно, окисление сплавов при высоких температурах приводит к образованию на поверхности металла оксидной пленки, или окалина. Именно от природы окислы зависит механизм процесса окисления. Если образующаяся окалина твердая, характер окисления определяется тем, как плотно она прилипает к поверхности реагирования, или же она пористая. Плотная окалина служит преградой, которая разделяет металл и газообразный кислород.

Применительно к изучаемой нами системе АМg2–Тl следует отметить, что легирование исходного алюминиевого сплава АМg2 таллием и образование оксида Тl₂O₃ снижает защитную способность пленки из оксида алюминия, превращая его из плотного в пористый, результатом чего является рост скорости окисления сплавов, о чем свидетельствует снижение величины кажущейся энергии активации процесса их окисления.

Таким образом, методом термогравиметрии исследована зависимость скорости окисления

алюминиевого сплава АМg2 от содержания таллия и температуры. Показано, что скорость окисления сплава АМg2 с ростом температуры и концентрации таллия увеличивается.

Список литературы

1. Свариваемые алюминиевые сплавы: свойства и применение / Д.И. Байков, Ю.С. Золотаревский, В.Л. Руссо [и др.]. – Л.: Судпромгиз, 1959. – 236 с.
2. Алюминиевый информационный портал: сайт. – 2017. – URL: <http://aluminium-guide.ru>.
3. Механические свойства сплава АМg5 в ультрамелкозернистом состоянии, полученного перемешивающей фрикционной обработкой листового проката различной толщины / А.А. Елисеев, Т.А. Калашникова, А.В. Филиппов [и др.] // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 12. – С. 278–283.
4. Влияние содержания галлия, индия и таллия на анодное поведение алюминиевого сплава АБ1 (Al+1%Be) в нейтральной среде / Р.Д. Исмонов, И.Н. Ганиев, Х.О. Одиназода, А.М. Сафаров, М.З. Курбонова // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2018. – № 2(24). – С. 22–26.
5. Повышение анодной устойчивости сплава АБ1 (Al+1%Be) легированием индием / Р.Д. Исмонов, И.Н. Ганиев, Х.О. Одиназода, А.М. Сафаров // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2018. – Т. 22, № 8. – С. 123–130.
6. Потенциодинамическое исследование сплава АБ1, легированного индием, в среде электролита 3%-ного NaCl / Р.Д. Исмонов, И.Н. Ганиев, Х.О. Одиназода, А.М. Сафаров // Известия АН Республики Таджикистан. – 2018. – № 1(170). – С. 78–83.
7. Кинетика окисления сплава Al+1%Be, легированного галлием, в твердом состоянии / Р.Д. Исмонов, И.Н. Ганиев, А.М. Сафаров, Х.Х. Азимов // Вестник Таджикского национального университета. – 2017. – № 1/3. – С. 134–138.
8. Анодное поведение сплава Al+1%Be, легированного празеодимом и неодимом, в среде электролита 3%-ного NaCl / Р.Д. Исмонов, И.Н. Ганиев, Х.О. Одинаев, А.М. Сафаров // ДАН РТ. – 2016. – Т. 59, № 1–2. – С. 67–75.
9. Kofstad P. Oxidation of Metals determination of activation energies / Acta. Chem. Scand. – 1958. – Vol. 12, no. 4. – P. 239.
10. Чистяков Ю.Д., Мальцев М.В. Электронографическое изучение процессов окисления алюминиевых сплавов // Кристаллография. – 1957. – Т. 2, вып. 5. – С. 628–633.
11. Взаимодействие жидких металлов и сплавов с кислородом / Б.Ш. Белоусова, В.М. Денисов, С.А. Истомин [и др.]; УрОРАН. – Екатеринбург, 2002. – 600 с.
12. Лепинских Б.М., Киташев А., Белоусов А.А. Окисление жидких металлов и сплавов. – М.: Наука, 1979. – 116 с.
13. Лепинских Б.М., Киселев В.И. Об окислении жидких металлов и сплавов кислородом из газовой фазы // Известия АН СССР. Металлы. – 1974. – № 5. – С. 51–54.

14. Лепинских Б.М., Белоусов А.А. Физико-химические свойства жидких сплавов щелочноземельных металлов с алюминием // Труды Института металлургии УНЦ АН СССР. – 1978. – № 31. – С. 29–39.

15. Белоусов А.А., Лепинских Б.М. Изучение кинетики окисления жидких сплавов барий–алюминий / Рукопись деп. в ВИНТИ. – № 555-76.

16. Радин А.Я., Радин А.Я. Исследование кинетики окисления алюминиевых сплавов в жидком состоянии // Вопросы технологии литейного производства. – 1961. – Вып. 49. – С. 98–118.

17. Максименко В.И., Максименко Л.С. Исследование кинетики окисления алюминия и его сплавов в жидком состоянии // Новое в теории и технологии металлургических процессов. – Красноярск, 1973. – С. 16–20.

18. Умаров М.А., Ганиев И.Н., Бердиев А.Э. Кинетика окисления сплавов свинца с магнием, в твердом состоянии // Известия Санкт-Петербургского государственного технического института (технологического университета). – 2016. – № 35 (61). – С. 34–38.

19. Кинетика окисления сплава Al+6%Li, модифицированного лантаном, в твердом состоянии / Ш.А. Назаров, И.Н. Ганиев, И. Калляри, А.Э. Бердиев, Н.И. Ганиева // Металлы. – 2018. – № 1. – С. 34–40.

20. Ганиев И.Н., Ганиева Н.И., Эшова Д.Б. Особенности окисления алюминиевых расплавов с редкоземельными металлами // Металлы. – 2018. – № 3. – С. 39–47.

21. Кинетика окисления алюминиевого сплава АК12М2, модифицированного барием, в твердом состоянии / Ф.Ш. Зокиров, И.Н. Ганиев, М.М. Сангов, А.Э. Бердиев // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). – 2020. – № 55 (81). – С. 28–33.

22. Кинетика окисления твердого сплава АК7М2, легированного германием / А.Э. Бердиев, И.Н. Ганиев, С.С. Гулов, М.М. Сангов // Изв. вузов. Сер. Химия и химическая технология. – 2013. – Т. 56, № 3. – С. 28–30.

23. Ганиев И.Н., Муллоева Н.М., Эшов Б.Б. Кинетика окисления сплавов Pb–Ca, в жидком состоянии // Журнал физической химии. – 2013. – Т. 87, № 11. – С. 1894–1897.

24. Влияние кальция на кинетику окисления сплава АК12М2 в твердом состоянии / Ф.Ш. Зокиров, И.Н. Ганиев, Н.И. Ганиева, М.М. Сангов // Вестник Таджикского национального университета. – 2018. – № 4. – С. 130–138.

25. Окисление сплавов системы Al–Ge, в жидком состоянии / Н.С. Олимов, И.Н. Ганиев, З.Р. Обидов, М.Ч. Ширинов // Расплавы. – 2015. – № 4. – С. 19–26.

26. Норова М.Т., Ганиев И.Н., Эшов Б.Б. Кинетика окисления сплава AMg0.2 с лантаном, празеодимом и неодимом, в твердом состоянии // Известия Санкт-Петербургского государственного технического института (технологического университета). – 2018. – № 44 (70). – С. 35–39.

27. Пулотов П.Р., Эшов Б.Б. Окисление промышленного сплава АМГ3 с добавками редкоземельных металлов // Известия АН Республики Таджикистан. – 2017. – № 4 (169). – С. 81–89.

References

1. Baikov D.I., Zolotarevskii Iu.S., Russo V.L. Svarivaiushchiesia aliuminievye splavy: svoystva i primeneniye [Weldable aluminum alloys: properties and applications]. Leningrad: Sudpromgiz, 1959, 236 p.

2. Aliuminievyi informatsionnyi portal [Aluminum Information Portal], 2017. URL: <http://aluminium-guide.ru>.

3. Eliseev A.A., Kalashnikova T.A., Filippov A.V. et al. Mekhanicheskie svoystva splava AMg5 v ul'tramelkozernistom sostoianii, poluchennogo peremeshivaiushchei friktsionnoi obrabotkoi listovogo prokata razlichnoi tolshchiny [Mechanical properties of AMg5 alloy in the ultra-fine-grained state, obtained by stirring friction treatment of sheet metal of different thicknesses]. *Fundamental'nye issledovaniia*, 2016, no. 12, pp. 278–283.

4. Ismonov R.D., Ganiev I.N., Odiazoda Kh.O., Safarov A.M., Kurbonova M.Z. Vliianie sodержaniia galliia, indii i talliia na anodnoe povedenie aliuminieвого сплава AB1 (Al+1%Ve) v neutral'noi srede [Influence of gallium, indium and thallium content on the anodic behavior of aluminum alloy AB1 (Al+1%Be) in a neutral environment]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo industrial'nogo universiteta*, 2018, no. 2(24), pp. 22–26.

5. Ismonov R.D., Ganiev I.N., Odiazoda Kh.O., Safarov A.M. Povyshenie anodnoi ustoychivosti сплава AB1 (Al+1%Be) legirovaniem indiem [Increasing the Anodic Stability of AB1 (Al+1%Be) Alloy by Indium Alloying]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2018, vol. 22, no. 8, pp. 123–130.

6. Ismonov R.D., Ganiev I.N., Odiazoda Kh.O., Safarov A.M. Potentsiodinamicheskoe issledovanie сплава AB1, legirovannogo indiem, v srede elektrolita 3%-nogo NaCl [Potentiodynamic study of indium-doped AB1 alloy in an electrolyte medium 3% NaCl]. *Izvestiia AN Respubliki Ta-dzhikistan*, 2018, no. 1(170), pp. 78–83.

7. Ismonov R.D., Ganiev I.N., Safarov A.M., Azimov Kh.Kh. Kinetika okisleniia сплава Al+1%Be, legirovannogo galliem, v tverdom sostoianii [Oxidation kinetics of gallium-doped Al+1%Be alloy in the solid state]. *Vestnik Tadzhikskogo natsional'nogo universiteta*, 2017, no. 1/3, pp. 134–138.

8. Ismonov R.D., Ganiev I.N., Odiazoda Kh.O., Safarov A.M. Anodnoe povedenie сплава Al+1%Be, legirovannogo prazeodimom i neodimom, v srede elektrolita 3%-nogo NaCl [Anodic behavior of Al+1%Be alloy doped with praseodymium and neodymium in 3% NaCl electrolyte]. *DAN RT*, 2016, vol. 59, no. 1–2, pp. 67–75.

9. Kofstad P. Oxidation of Metals determination of activation energies. *Acta. Chem. Scand.*, 1958, vol. 12, no. 4, p. 239.

10. Chistiakov Iu.D., Mal'tsev M.V. Elektronograficheskoe izuchenie protsessov okisleniia aliuminievykh сплавов [Electronographic study of oxidation processes of aluminum alloys]. *Kristallografiia*, 1957, vol. 2, iss. 5, pp. 628–633.

11. Belousova B.Sh., Denisov V.M., Istomin S.A. Vzaimodeistvie zhidkikh metallov i сплавов s kislorodom [Interaction of liquid metals and alloys with oxygen]. UrORAN. Ekaterinburg, 2002, 600 p.

12. Lepinskikh B.M., Kitashev A., Belousov A.A. Okislenie zhidkikh metallov i сплавов [Oxidation of liquid metals and alloys]. Moscow: Nauka, 1979, 116 p.

13. Lepinskikh B.M., Kiselev V.I. Ob okislenii zhidkikh metallov i splavov kislorodom iz gazovoi fazy [Oxidation of Liquid Metals and Alloys by Oxygen from the Gas Phase]. *Izvestiia AN SSSR. Metall*, 1974, no. 5, pp. 51–54.

14. Lepinskikh B.M., Belousov A.A. Fiziko-khimicheskie svoystva zhidkikh splavov shchelochnozemel'nykh metallov s aliuminiem [Physical and chemical properties of liquid alloys of alkali earth metals with aluminum]. *Trudy Instituta metallurgii UNTs AN SSSR*, 1978, no. 31, pp. 29–39.

15. Belousov A.A., Lepinskikh B.M. Izuchenie kinetiki okisleniia zhidkikh splavov barii-aliuminii [Study of the oxidation kinetics of liquid barium-aluminum alloys]. *Rukopis' dep. v VINITI*, no. 555-76.

16. Radin A.Ia., Radin A.Ia. Issledovanie kinetiki okisleniia aliuminievykh splavov v zhidkom sostoianii [Investigation of the oxidation kinetics of aluminum alloys in the liquid state]. *Voprosy tekhnologii liteinogo proizvodstva*, 1961, iss. 49, pp. 98–118.

17. Maksimenko V.I., Maksimenko L.S. Issledovanie kinetiki okisleniia aliuminiia i ego splavov v zhidkom sostoianii [Investigation of the oxidation kinetics of aluminum and its alloys in the liquid state]. *Novoe v teorii i tekhnologii metallurgicheskikh protsessov*. Krasnoiar'sk, 1973, pp. 16–20.

18. Umarov M.A., Ganiev I.N., Berdiev A.E. Kinetika okisleniia splavov svints'a s magni'em, v tverdom sostoianii [Oxidation kinetics of lead-magnesium alloys in the solid state]. *Izvestiia Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo instituta (tekhnologicheskogo universiteta)*, 2016, no. 35 (61), pp. 34–38.

19. Nazarov Sh.A., Ganiev I.N., Kalliari I., Berdiev A.E., Ganieva N.I. Kinetika okisleniia splava Al+6%Li, modifitsirovannogo lantanom, v tverdom sostoianii [Oxidation kinetics of Al+6%Li alloy modified with lanthanum in the solid state]. *Metally*, 2018, no. 1, pp. 34–40.

20. Ganiev I.N., Ganieva N.I., Eshova D.B. Osobennosti okisleniia aliuminievykh rasplavov s redkozemel'nymi metallami [Oxidation features of aluminum melts with rare-earth metals]. *Metally*, 2018, no. 3, pp. 39–47.

21. Zokirov F.Sh., Ganiev I.N., Sangov M.M., Berdiev A.E. Kinetika okisleniia aliuminieвого splava AK12M2, modifitsirovannogo bari'em, v tverdom sostoianii [Oxidation kinetics of barium-modified AK12M2 aluminum alloy in the solid state]. *Izvestiia Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo instituta (tekhnicheskogo universiteta)*, 2020, no. 55 (81), pp. 28–33.

22. Berdiev A.E., Ganiev I.N., Gulov S.S., Sangov M.M. Kinetika okisleniia tverdogo splava AK7M2, legirovannogo germani'em [Oxidation kinetics of germanium-alloyed AK7M2 hard alloy]. *Izvestiia vuzov. Seriya Khimiia i khimicheskai tekhnologiya*, 2013, vol. 56, no. 3, pp. 28–30.

23. Ganiev I.N., Mulloeva N.M., Eshov B.B. Kinetika okisleniia splavov Pb–Ca, v zhidkom sostoianii [Oxidation kinetics of Pb–Ca alloys, in liquid state]. *Zhurnal fizicheskoi khimii*, 2013, vol. 87, no. 11, pp. 1894–1897.

24. Zokirov F.Sh., Ganiev I.N., Ganieva N.I., Sangov M.M. Vliianie kal'tsiia na kinetiku okisleniia splava AK12M2 v tverdom sostoianii [Calcium influence on the oxidation kinetics of AK12M2 alloy in the solid state]. *Vestnik Tadjikskogo natsional'nogo universiteta*, 2018, no. 4, pp. 130–138.

25. Olimov N.S., Ganiev I.N., Obidov Z.R., Shirinov M.Ch. Okislenie splavov sistemy Al–Ge, v zhidkom

sostoianii [Oxidation of Al–Ge alloys in the liquid state]. *Rasplavy*, 2015, no. 4, pp. 19–26.

26. Norova M.T., Ganiev I.N., Eshov B.B. Kinetika okisleniia splava AMg0.2 s lantanom, prazeodimom i neodimom, v tverdom sostoianii [Oxidation kinetics of alloy AMg0.2 with lanthanum, praseodymium, and neodymium, in the solid state]. *Izvestiia Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo instituta (tekhnologicheskogo universiteta)*, 2018, no. 44 (70), pp. 35–39.

27. Pulotov P.R., Eshov B.B. Okislenie promyshlennogo splava AMg3 s dobavkami redkozemel'nykh metallov [Oxidation of industrial alloy AMg3 with additives of rare-earth metals]. *Izvestiia AN Respubliki Tadjikistan*, 2017, no. 4 (169), pp. 81–89.

Получено 22.01.2021

Опубликовано 25.06.2021

Сведения об авторах

Ганиев Изатулло Наврузович (Душанбе, Республика Таджикистан) – доктор химических наук, профессор, академик НАНТ, завлабораторией Института химии им. В.И. Никитина Национальной академии наук Таджикистана, e-mail: ganievizatullo48@gmail.com.

Зокиров Фуркатшох Шахриерович (Душанбе, Республика Таджикистан) – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры физики Таджикского технического университета им. академика М.С. Осими, e-mail: Zokirov090514@mail.ru.

Шарипова Хилола Якубовна (Душанбе, Республика Таджикистан) – преподаватель кафедры химии Хатлонского государственного медицинского университета, г. Дангара.

Иброхимов Насимжон Файзуллоевич (Душанбе, Республика Таджикистан) – кандидат технических наук, и.о. доцента кафедры материаловедения, металлургических машин и оборудования Таджикского технического университета им. академика М.С. Осими, e-mail: nasimqon@mail.ru.

About the authors

Izatullo N. Ganiev (Dushanbe, Republic of Tajikistan) – Doctor of Chemical Sciences, Professor, Academician NAST, Head of Laboratory, Institute of Chemistry named after V.I. Nikitin of the National Academy of Sciences of Tajikistan, e-mail: ganievizatullo48@gmail.com.

Furkatshokh Sh. Zokirov (Dushanbe, Republic of Tajikistan) – Ph.D. in Technical Sciences, Senior Lecturer, Department of Physics, Tajik Technical University named after academician M.S. Osimi, e-mail: Zokirov090514@mail.ru.

Khilola Ya. Sharipova (Dushanbe, Republic of Tajikistan) – Lecturer, Department of Chemistry, Khatlon State Medical University, Dangara.

Nasimjon F. Ibrokhimov (Dushanbe, Republic of Tajikistan) – Ph.D. in Technical Sciences, Acting Associate Professor, Department of Materials Science, Metallurgical Machines and Equipment, Tajik Technical University named after academician M.S. Osimi, e-mail: nasimqon@mail.ru.