

ISSN 1999-4125 (Print)

ISSN 2949-0642 (Online)

Научная статья

УДК 669.45.018.8.24/884

DOI: 10.26730/1999-4125-2026-2-77-89

КИНЕТИКА ОКИСЛЕНИЯ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА $AlMg_{5,5}Li_{2,1}Zr_{0,15}$ ТИПА ДЮРАЛЮМИН С ЛАНТАНОМ В ТВЕРДОМ СОСТОЯНИИ

Худойбердизода Саидмири Убайдулло ¹, Ганиев Изатулло Наврузович ¹,
Савдуллоева Салима Савдуллоевна ¹, Джайлоев Джамшед Хусейнович ¹,
Саидзода Масрур Мирзохон ², Киреев Сергей Юрьевич ³,
Норова Муаттара Турдиевна ⁴

¹ Институт химии им. В. И. Никитина НАН Таджикистана

² Худжандский Международный институт Международного университета туризма и предпринимательства Таджикистана

³ Политехнический институт Пензенского государственного университета

⁴ Таджикский национальный университет

* e-mail: ganievizatullo48@gmail.com



Информация о статье

Поступила:

05 ноября 2025 г.

Одобрена после
рецензирования:

15 мая 2026 г.

Принята к публикации:

11 июня 2026 г.

Опубликована:

29 июня 2026 г.

Ключевые слова:

алюминиевый сплав

$AlMg_{5,5}Li_{2,1}Zr_{0,15}$ типа

дюралюмин, лантан,

термогравиметрический

метод, кинетика окисления,

истинная скорость окисления,

кажущаяся энергия активации

Аннотация.

Исследование высокотемпературного окисления алюминиевых сплавов сохраняет высокую актуальность в связи с растущими требованиями к конструкционным материалам, работающим в экстремальных условиях современных отраслей техники, таких как аэрокосмическая промышленность, энергетика и производство наноматериалов. Понимание кинетики окисления позволяет целенаправленно создавать материалы с повышенной жаростойкостью и длительным ресурсом эксплуатации. Работа посвящена изучению влияния легирования лантаном на кинетику окисления сплава $AlMg_{5,5}Li_{2,1}Zr_{0,15}$ типа дюралюмин в твердом состоянии. Экспериментальные исследования выполнены методом высокотемпературной термогравиметрии в изотермических условиях при температурах 723, 773 и 823 К в атмосфере воздуха с использованием оригинальной установки непрерывного взвешивания. Для анализа образующихся продуктов окисления использован рентгенофазовый анализ (дифрактометр ДРОН-3М), а для оценки влияния добавки на морфологию – металлографический метод с применением светового микроскопа. Проведена математическая обработка кинетических данных с построением квадратичных зависимостей, полиномиальных аппроксимаций и изохрон окисления. Проанализирована эволюция скорости процесса в зависимости от концентрации легирующего элемента. Получены кинетические кривые окисления, определены истинная скорость окисления и кажущаяся энергия активации процесса. Установлено, что введение лантана в количестве до 1,0 мас. % приводит к увеличению скорости окисления сплава и снижению кажущейся энергии активации, что связано с образованием пористой многокомпонентной оксидной фазы типа шпинелей, облегчающей диффузию кислорода. Микроструктурный анализ подтвердил измельчение зерна и повышение однородности структуры при легировании лантаном, что указывает на его роль как модификатора структуры.

Для цитирования: Худойбердизода С.У., Ганиев И.Н., Савдуллоева С.С., Джайлоев Д.Х., Саидзода М.М., Киреев С.Ю., Норова М.Т. Кинетика окисления алюминиевого сплава $AlMg_{5,5}Li_{2,1}Zr_{0,15}$ типа дюралюмин с лантаном в твердом состоянии // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2026. № 2 (174). С. 77-89. DOI: 10.26730/1999-4125-2026-2-77-89, EDN: UGJVAY

Введение

В последние годы интерес исследователей к проблемам окисления металлов и сплавов возрос, что объясняется большим практическим значением таких реакций. Без знаний процесса окисления металлов невозможно решить проблему выбора и изыскания жаростойких металлических материалов, которые предназначены для изготовления нагревателей, печей, теплообменников и других изделий технического назначения. В связи с развитием новых отраслей техники, таких как ракетостроение, производство полупроводниковых материалов, порошковой металлургии, нанотехнологии и наноматериалов, вопросы грамотного подбора материалов, работающих при высоких температурах, остаются актуальными. Развитие современной техники предъявляет все новые и более жесткие требования к конструкционным материалам, работающим в условиях высоких температур, нагрузок, давлений и агрессивных сред. В связи с тем, что чистые металлы редко используются в качестве конструкционных материалов, актуальны вопросы окисления сплавов и методы повышения их сопротивления окислению.

Промышленные алюминиевые сплавы выпускаются в двух видах: литейные, детали из которых изготавливаются литьем, и деформационные – сплавы, выпускаемые в виде деформируемых полуфабрикатов: листов, фольги, плит, профилей, проволоки. Отливки из алюминиевых сплавов получают всеми возможными способами литья. Наиболее распространено литье под давлением, в кокиль и в песчано-глинистые формы. При изготовлении небольших партий применяется литье в гипсовые комбинированные формы и литье по выплавляемым моделям. Из литейных сплавов изготавливают литежные роторы электромоторов, литежные детали летательных аппаратов и др. Деформируемые сплавы используются в автомобильном производстве для внутренней отделки, бамперов, панелей кузовов и деталей интерьера; в строительстве как отделочный материал; в летательных аппаратах: деформированные – в основном дюралюминий, и литейные – главным образом силумин [1–3].

В середине 19 века во Франции был разработан более дешевый метод получения алюминия за авторством химика и промышленника Сент-Клер Девиля. Им было принято решение использовать вместо дорогостоящего калия дешевый и доступный натрий. В середине 19 века на экспозиции во Франции «серебро из глины» оказало большое впечатление на публику [4–6]. Император Наполеон III, за столом которого особо важным гостям подавали приборы из алюминия,

вознамерился оснастить свое войско кирасами из легкого металла. Он оказал Девилю денежную поддержку, и тот построил несколько заводов по производству. Однако металл все еще оставался дорогим и использовался для изготовления предметов роскоши и ювелирных украшений.

Более приемлемый способ производства алюминия был открыт лишь к концу 19 века. Его одновременно и независимо друг от друга разработали американский студент Чарльз Холл и французский инженер Поль Эру. Предложенный ими электролитический метод расплавленного в криолите оксида алюминия показывал хороший результат, однако был достаточно энергозатратным. При строительстве первого завода эту проблему решили, разместив предприятие рядом со знаменитым Рейнским водопадом в Швейцарии.

Работавший в России австрийский инженер Байер разработал метод получения глинозема, который сделал новый способ еще менее затратным. Изыскания Байера и Холла–Эру и сейчас применяются на современных металлургических заводах, работающих с алюминием.

Новый материал показывал разносторонне положительные качества, кроме одного: для некоторых сфер использования чистый алюминий не обладал достаточной прочностью. Данным вопросом занимался немецкий химик Альфред Вильм, в своих изысканиях он делал сплавы алюминия с малыми количествами магния, меди и марганца. Стало известно, что прочность сплава повышается в течение нескольких дней после закалки [7–10].

В 1911 году в немецком Дюрене был открыт новый сплав, который отличался более высокой прочностью и меньшим удельным весом, названный дюралюминий, а в 1919 году из него был сделан первый самолет [11–14].

Так началось широкое распространение алюминия по миру. Если в 1900 году в год производили около 8 тысяч тонн легкого металла, то через сто лет объем его производства достиг 24 миллионов тонн.

Наряду с высокими эксплуатационными свойствами разнообразное применение дюралюмина обусловлено его высокой технологичностью, что создает предпосылки для получения изделий всеми известными методами литья и пластической обработки. Дюралюмин относится к категории конструкционных сплавов, которые отличаются повышенной прочностью. Основу их составляет алюминий. В качестве добавок используют медь, марганец, магний, литий в разных процентных соотношениях. Свойства дюралюмина зависят от термической обработки и количества добавленных легирующих элементов [3].

Однако металлы и сплавы, в частности, алюминиевые, как в стадии производства, так и при эксплуатации в виде изделий, конструкций и оборудования подвержены окислению. Окисление приводит к преждевременному износу и разрушению конструкций и оборудования, потере их функциональных характеристик, что связано с огромными экономическими затратами. В этой связи изучение окисления алюминиевых сплавов представляется весьма актуальным как для теории металловедения, так и для практики [4–5].

В связи с этим в рамках данной работы методом высокотемпературной термогравиметрии, основанной на непрерывном взвешивании образца при постоянной температуре, исследовано влияние лантана на кинетику окисления сплава $\text{AlMg}_{5,5}\text{Li}_{2,1}\text{Zr}_{0,15}$ типа дюралюмин.

Материалы и методика исследования

Изучение кинетики окисления металлов проводили, используя метод непрерывного взвешивания образцов, который применяется обычно при изучении высокотемпературной коррозии твердых металлов [8].

Кинетику окисления сплавов исследовали по указанной выше методике в неизотермических условиях в атмосфере воздуха по методике, описанной в работах [6–11]. Схема установки для исследования кинетики окисления сплавов приведена на Рис. 1. Основные части установки – это печь Таммана (1) и ее чехол из оксида алюминия (2). При проведении экспериментов чехол в верхней части закрывается водоохлаждающими крышками (7). Крышки имеют отверстия для газопроводящей трубки (3), тигля (4), для образцов из сплавов и термопары (5). Образец подвешивается на платиновой нити (6) к пружине. Пружина (12) изготовлена из молибденовой проволоки. Пружину калибруют предварительно и вводят в баллон из молибденового стекла (11) с притертой крышкой (14). Чехол с пружиной закрепляют на подставке (13), независимой от печи, для исключения вибрации и сотрясений. Для защиты весов от теплового излучения печи на нижнем конце баллона используют трон и холодильник (15).

По растяжению пружины с помощью катетометра КМ-8 осуществляется фиксация изменения массы образца. В наших опытах применяли тигли из оксида алюминия диаметром 18–20 и высотой 25–26 мм. Перед опытом тигли прокаливались до постоянного веса при 1273–1473 К в окислительной среде в течение 1,5 часов до постоянной массы. Окисления сплавов в твердом состоянии проводили на воздухе при постоянных температурах 773 К, 823 К и 873 К. Тигель с исследуемым образцом помещался в изотермическую зону печи. Разогрев металла

выполняли в атмосфере воздуха. Подъем температуры проводили со скоростью 2–3°С/мин. Перед разогревом печи катетометр настраивали на указатель пружины, записывали на шкале точку отсчета и в течение нагрева контролировали изменение массы. При достижении заданного режима записывали новую точку отсчета.

Изучение микроструктуры является одним из главных средств исследования сплавов. Это дает возможность определять влияние различных деформационных и термических обработок на свойства готовых алюминиевых изделий, а также анализировать причины брака. Исследования позволяют точно определить протяженность границы гомогенных и гетерогенных областей, наблюдать изменения микроструктуры в зависимости от состава сплава, а также наличие интерметаллидных фаз в системе. Микроскопический метод исследования металлов и сплавов, кратко – микроанализ, заключается в изучении строения (структуры) при помощи микроскопа на специально приготовленных образцах, называемых микрошлифами. Приготовление микрошлифа для изучения микроструктуры обычно начинается с вырезания образца из определенного участка изучаемого объекта. Этот участок определяется целью проводимого исследования (например, ближе к излому или трещине на изделии). Наиболее удобными для приготовления микрошлифов являются образцы цилиндрического или квадратного сечения диаметром или стороной квадрата от 10 до 20 мм и высотой от 10 до 30 мм. Заточенный образец шлифуется на шлифовальной бумаге до полного удаления рисок, с постепенным переходом 82 от бумаги с зернистостью абразива 150–50 мкм до бумаги микронной зернистости (20–5 мкм). При переходе с одной бумаги на другую, более тонкую, необходимо очищать образец и менять направление шлифовки на 90°. Шлифовка образцов производится на специальных станках с закреплением шлифовальной бумаги на вращающихся дисках или лентах. Полирование ведется на вращающихся кругах диаметром 250 мм, обтянутых грубым сукном (предварительное полирование) или фетром (окончательное полирование) [15–22].

Для исследования микроструктуры исследуемых образцов из полученного расплава отливались цилиндрические образцы диаметром 10–16 мм и длиной 5–10 мм. Каждый образец предварительно отшлифовывали, обезжиривали спиртом и погружали в 20% водный раствор азотной кислоты. Время травления составляло от 10 до 20 с. После травления микрошлиф промывали в проточной воде и тщательно высушивали прижатием к чистой фильтровальной бумаге.

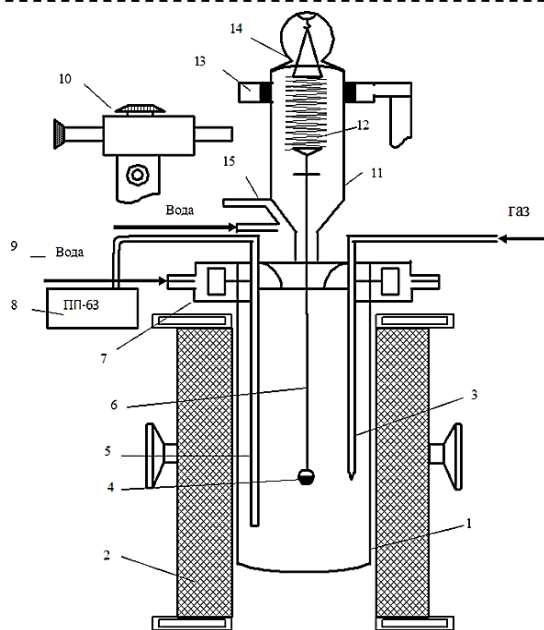


Рис. 1. Схема установки для изучения кинетики окисления металлов и сплавов

Fig. 1. Diagram of an installation for studying the kinetics of oxidation of metals and alloys

Таблица 1. Кинетические и энергетические параметры процесса окисления сплава $AlMg_{5,5}Li_{2,1}Zr_{0,15}$ типа дюралюмин с лантаном в твердом состоянии
Table 1. Kinetic and energy parameters of the oxidation process of the alloy $AlMg_{5,5}Li_{2,1}Zr_{0,15}$ type duralumin with lanthanum in the solid state

Содержание лантана в сплаве, мас. %	Температура окисления, К	Истинная скорость окисления $K \cdot 10^4$, $кг \cdot м^{-2} \cdot с^{-1}$	Кажущаяся энергия активации, кДж/моль
0.0	723	2.25	155.5
	773	2.43	
	823	2.70	
0.01	723	2.33	152.7
	773	2.51	
	823	2.77	
0.1	723	2.39	149.1
	773	2.56	
	823	2.82	
0.5	723	2.45	146.0
	773	2.61	
	823	2.87	
1.0	723	2.51	142.9
	773	2.67	
	823	2.93	

K – истинная скорость окисления;

Q – кажущаяся энергия активации окисления.

Среднюю скорость окисления сплавов определяли по касательным, проведенным через большинство экспериментальных точек к кривым окисления сплавов.

Результаты термогравиметрического исследования кинетики окисления алюминиевого сплава $AlMg_{5,5}Li_{2,1}Zr_{0,15}$ типа дюралюмин, легированного лантаном, приведены в Таблице 1. Видно, что средняя скорость окисления исходного сплава в зависимости от состава в пределах концентрации добавки 0,01-1,0 мас. % лантан и от температуры исследуемых сплавов увеличивается. Так, средняя скорость окисления исходного сплава в интервале температур 723, 773 и 823K имеет величину $2,25 \cdot 10^{-4}$ до $2,70 \cdot 10^{-4}$ $кг \cdot м^{-2} \cdot с^{-1}$, а для сплава с добавкой 1,0 мас.% лантана достигает величины $2,51 \cdot 10^{-4}$ до $2,93 \cdot 10^{-4}$ $кг \cdot м^{-2} \cdot с^{-1}$ при тех же температурах.

Эффективная энергия активации процесса окисления вышеуказанных сплавов при этом уменьшается соответственно от 155,5 до 142,9 кДж/моль. Кинетические и энергетические параметры процесса окисления сплавов зависят от структуры образующей оксидной пленки. Если образующаяся на образцах оксидная пленка рыхлая, то процесс переноса кислорода через нее облегчается и, соответственно, увеличивается скорость окисления. Образование плотной пленки затрудняет транспорт кислорода через нее, что приводит к понижению скорости процесса. В качестве примера на Рис. 2 приведены кинетические кривые окисления, характеризующие изменение массы во времени для алюминиевого сплава $AlMg_{5,5}Li_{2,1}Zr_{0,15}$ типа дюралюмин, содержащего 0,01, 0,1, 0,5 и 1,0 мас. % лантан, при температурах 723, 773 и 823K. Процесс окисления протекает с диффузионными затруднениями и заканчивается на 15–20 минутах.

Квадратические кинетические кривые окисления сплава $AlMg_{5,5}Li_{2,1}Zr_{0,15}$ типа дюралюмин с 0,1, 0,5 и 1,0 мас. % лантаном представлены на Рис. 3.

Результаты математической обработки квадратичных кинетических кривых окисления сплавов в координатах $(g/s)^2-t$ обобщены в Таблице 2. Полиномы кривых окисления сплавов свидетельствуют, что процесс окисления описывается

гиперболическим уравнением $y = kx^n$, где значение $n = 1/4$.

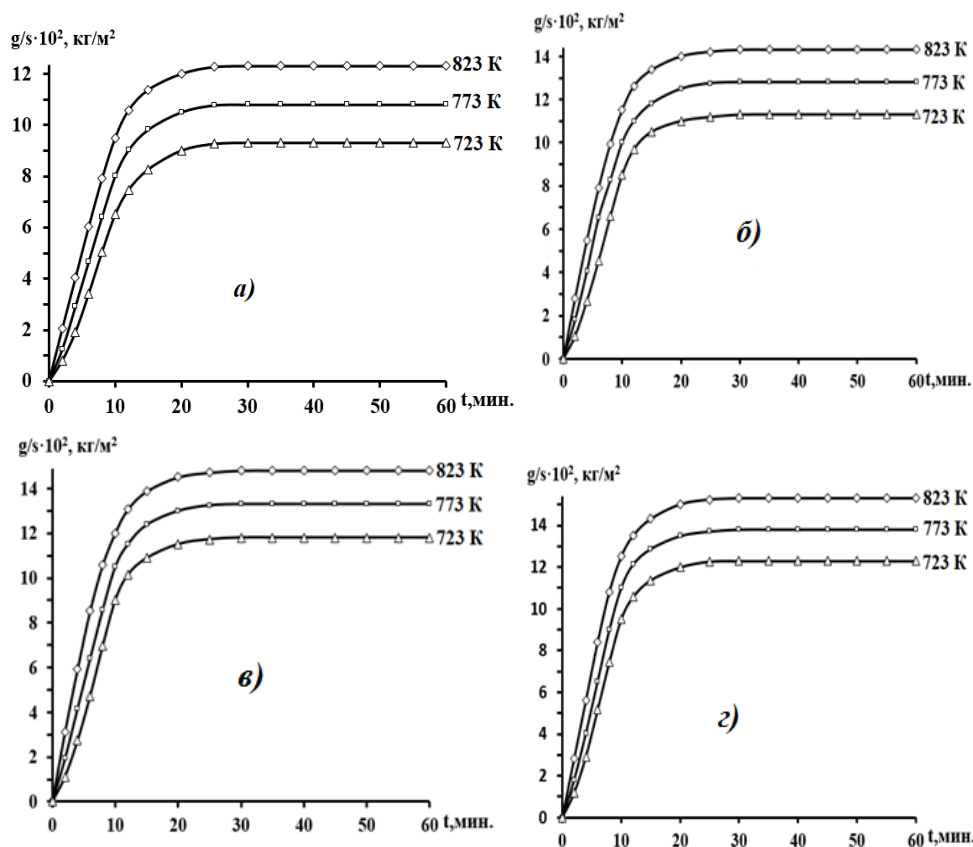


Рис. 2. Кинетические кривые окисления сплава $AlMg_{5.5}Li_{2.1}Zr_{0.15}$ типа дюралюмин (а) с лантаном мас. %: 0,1(б); 0,5(в); 1,0(г)

Fig. 2. Kinetic curves of oxidation of the alloy $AlMg_{5.5}Li_{2.1}Zr_{0.15}$ type duralumin (a) with lanthanum by weight %: 0.1(b); 0.5(c); 1.0(d)

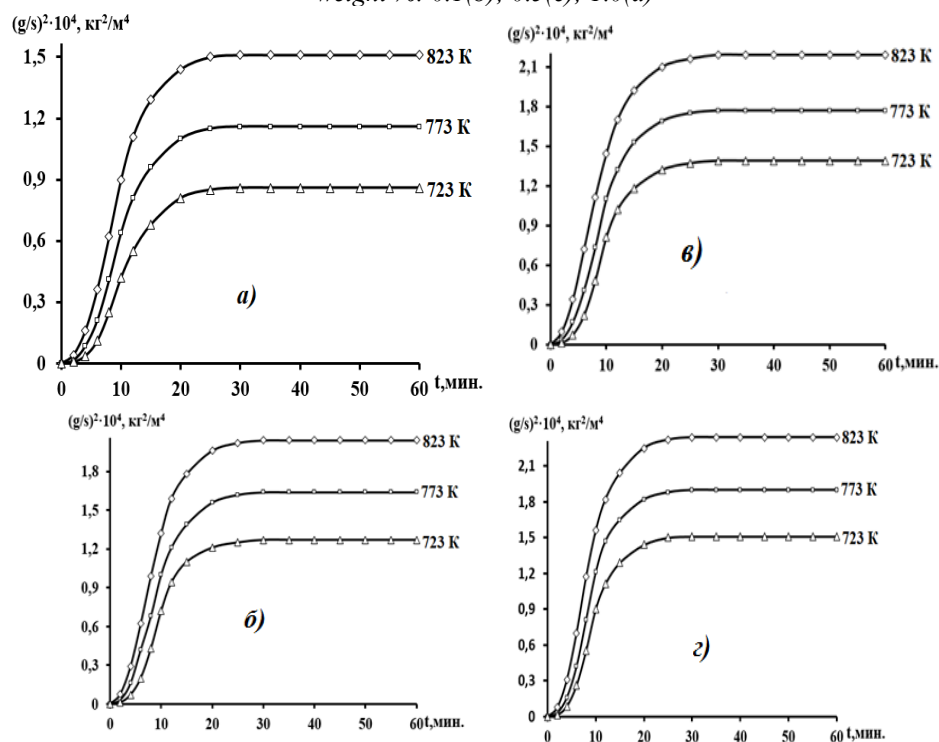


Рис. 3. Квадратические кривые окисления сплава $AlMg_{5.5}Li_{2.1}Zr_{0.15}$ типа дюралюмин (а) с лантаном, мас. %: 0,1(б); 0,5(в); 1,0(г)

Fig. 3. Quadratic oxidation curves of the alloy $AlMg_{5.5}Li_{2.1}Zr_{0.15}$ type duralumin (a) with lanthanum, % by weight: 0.1(b); 0.5(c); 1.0(d)

Таблица 2. Полиномы квадратичных кинетических кривых окисления алюминиевого сплава $AlMg_{5,5}Li_{2,1}Zr_{0,15}$ типа дюралюмин с лантаном в твердом состоянии
 Table 2. Polynomials of quadratic kinetic curves of oxidation of aluminum alloy $AlMg_{5,5}Li_{2,1}Zr_{0,15}$ type duralumin with lanthanum in solid state

Содержание лантана в сплаве, мас. %	Температура окисления, К	Полиномы квадратичных кинетических кривых окисления сплавов	Коэффициент регрессии R
0.0	723	$y = -0,7 \cdot 10^{-7}x^4 + 0,2 \cdot 10^{-3}x^3 - 2,31 \cdot 10^{-2}x^2 + 0,8133x$	0,982
	773	$y = -0,6 \cdot 10^{-3}x^4 + 0,5 \cdot 10^{-3}x^3 - 3,7 \cdot 10^{-2}x^2 + 1,0735x$	0,989
	823	$y = -0,6 \cdot 10^{-5}x^4 + 0,9 \cdot 10^{-3}x^3 - 5,3 \cdot 10^{-2}x^2 + 1,3589x$	0,995
0.01	723	$y = -0,6 \cdot 10^{-2}x^4 + 0,4 \cdot 10^{-3}x^3 - 3,38 \cdot 10^{-2}x^2 + 1,0373x$	0,980
	773	$y = -0,6 \cdot 10^{-5}x^4 + 0,8 \cdot 10^{-3}x^3 - 5,01 \cdot 10^{-2}x^2 + 1,3259x$	0,990
	823	$y = -0,6 \cdot 10^{-8}x^4 + 1,2 \cdot 10^{-3}x^3 - 6,91 \cdot 10^{-2}x^2 + 1,6437x$	0,997
0.1	723	$y = -0,6 \cdot 10^{-2}x^4 + 0,5 \cdot 10^{-3}x^3 - 3,69 \cdot 10^{-2}x^2 + 1,1061x$	0,979
	773	$y = -0,6 \cdot 10^{-5}x^4 + 0,9 \cdot 10^{-3}x^3 - 5,55 \cdot 10^{-2}x^2 + 1,419x$	0,993
	823	$y = -0,6 \cdot 10^{-8}x^4 + 1,3 \cdot 10^{-3}x^3 - 7,39 \cdot 10^{-2}x^2 + 1,7323x$	0,997
0.5	723	$y = -0,6 \cdot 10^{-3}x^4 + 0,5 \cdot 10^{-3}x^3 - 3,88 \cdot 10^{-2}x^2 + 1,1594x$	0,978
	773	$y = -0,6 \cdot 10^{-5}x^4 + 0,9 \cdot 10^{-3}x^3 - 5,68 \cdot 10^{-2}x^2 + 1,4668x$	0,991
	823	$y = -0,5 \cdot 10^{-1}x^4 + 1,5 \cdot 10^{-3}x^3 - 8,03 \cdot 10^{-2}x^2 + 1,8402x$	0,997
1.0	723	$y = -0,6 \cdot 10^{-3}x^4 + 0,6 \cdot 10^{-3}x^3 - 426 \cdot 10^{-2}x^2 + 1,2368x$	0,980
	773	$y = -0,6 \cdot 10^{-6}x^4 + 1 \cdot 10^{-3}x^3 - 5,86 \cdot 10^{-2}x^2 + 1,5204x$	0,987
	823	$y = -0,6 \cdot 10^{-9}x^4 + 1,4 \cdot 10^{-3}x^3 - 7,87 \cdot 10^{-2}x^2 + 1,8524x$	0,995

y^* – удельный привес массы образцов, кг/м²;

x^* – продолжительность времени окисления образцов, мин.

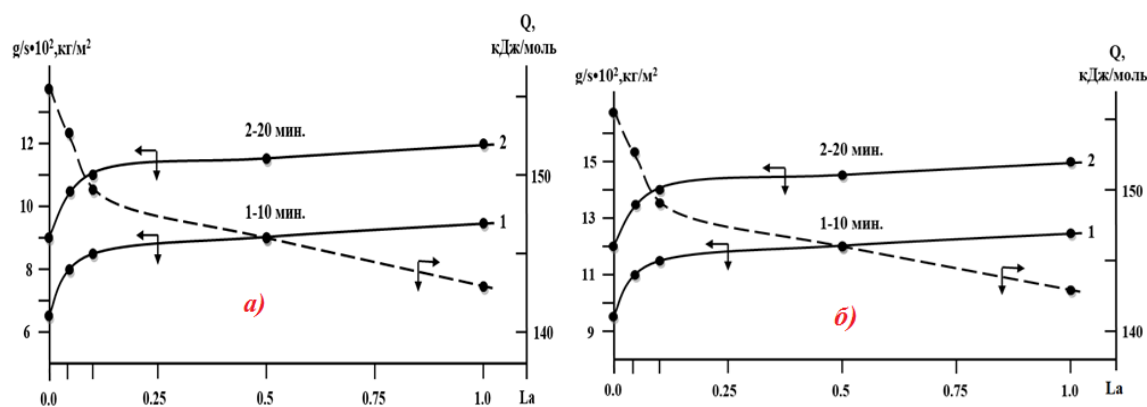


Рис. 4. Изохроны окисления алюминиевого сплава $AlMg_{5,5}Li_{2,1}Zr_{0,15}$ типа дюралюмин с лантаном при 723 К (а) и 823 К (б)

Fig. 4. Isochronous oxidation of aluminum alloy $AlMg_{5,5}Li_{2,1}Zr_{0,15}$ of the duralumin type with lanthanum at 723 K (a) and 823 K (b)

Изохроны окисления сплавов, соответствующих температуре 723 К и 823 К, приведены на Рис. 4. Отмечается тенденция роста скорости окисления исходного сплава по мере увеличения содержания лантана до 1,0 мас. %, что сопровождается понижением кажущейся энергии активации процесса окисления.

На Рис. 5 приведена зависимость $-\lg K - 1/T$ для алюминиевого сплава $AlMg_{5,5}Li_{2,1}Zr_{0,15}$ типа дюралюмин с лантаном. Видно, что в целом в координатах $-\lg K - 1/T$ кривые имеют

прямолинейный характер, и линии, относящиеся к сплавам с лантаном, располагаются выше кривой для исходного сплава $AlMg_{5,5}Li_{2,1}Zr_{0,15}$ типа дюралюмин.

Легированные лантаном сплавы характеризуются более высоким значением истинной скорости окисления по сравнению с исходным алюминиевым сплавом $AlMg_{5,5}Li_{2,1}Zr_{0,15}$. Как известно, суммарная скорость окисления складывается из целого ряда этапов, различных по своей природе. Тем не

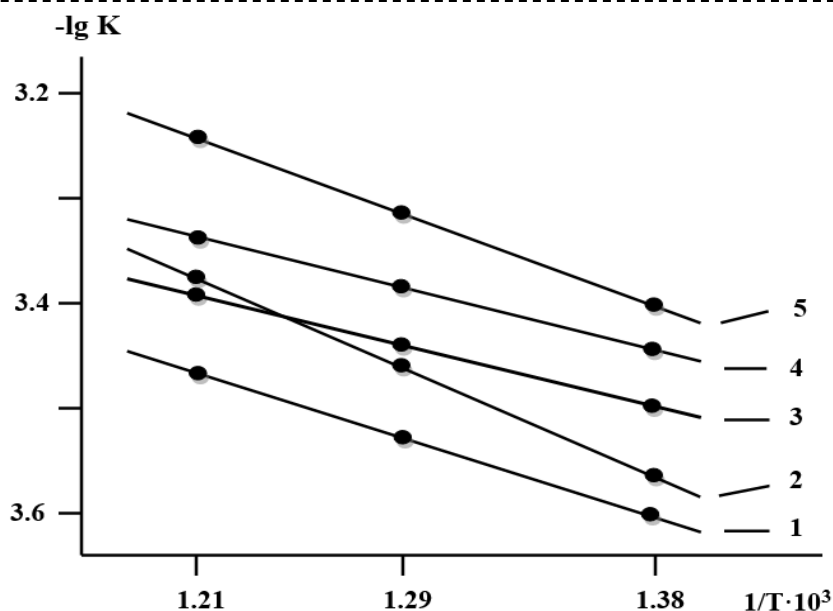


Рис. 5. Зависимость $-\lg K$ от $1/T$ для алюминиевого сплава $AlMg_{5.5}Li_{2.1}Zr_{0.15}$ типа дюралюмин (1) с лантаном, мас. %: 0,01(2); 0,1(3); 0,5(4); 1,0(5)

Fig. 5. Dependence of $-\lg K$ on $1/T$ for aluminum alloy $AlMg_{5.5}Li_{2.1}Zr_{0.15}$ type duralumin (1) with lanthanum, wt. %: 0,01(2); 0,1(3); 0,5(4); 1,0(5)

менее, можно проследить некоторые закономерности, характерные для окисления сплавов данной системы в твердом состоянии. Это прежде всего то, что с ростом температуры скорость окисления сплавов растет. Добавка лантана уменьшает кажущуюся энергию активации процесса окисления алюминиевого сплава $AlMg_{5.5}Li_{2.1}Zr_{0.15}$ типа дюралюмин в твердом состоянии. Константы истинной скорости окисления при одинаковых температурах у сплава $AlMg_{5.5}Li_{2.1}Zr_{0.15}$ с 0,01÷1,0 мас. % лантаном несколько больше, чем у исходного сплава. С повышением температуры и при увеличении содержания лантана в сплаве $AlMg_{5.5}Li_{2.1}Zr_{0.15}$ скорость окисления сплавов повышается.

Для исследования фазового состава образующихся пленок использовали метод рентгенофазового анализа.

Исследования проводились на рентгеновском дифрактометре ДРОН-ЗМ с использованием медного $K\alpha$ -излучения. Образцы в виде порошка готовили в агатовой ступке и насыпали на поверхность каретки аппарата тонким равномерным слоем для снятия дифрактограммы. Фазовый состав продуктов окисления определяли путем обработки дифрактограммы некоторых образцов на компьютере с заданной программой.

В качестве примера на Рис. 6. приведены рентгенограммы продуктов окисления алюминиевого сплава $AlMg_{5.5}Li_{2.1}Zr_{0.15}$ (а), легированного 1,0 мас. % лантаном (б). Исследование продуктов окисления данных сплавов показало, что при окислении сплавов образуются как простые, так и сложные оксиды,

в том числе: $MgAl_2O_4$; Li_2O ; $(Mg_{0.4}Al_{0.6})Al_{1.8}O_4$; Al_2O_3 ; $(Mg_{0.4}Al_{0.6})Al_{1.8}O_4ZrO_2$; $MgAl_2O_4$; (а), $(Mg_{0.68}Al_{0.32})(Al_{0.84}Mg_{0.16})_2O_4$; $MgAl_2O_4$; $LiAl_5O_8$; $(Mg_{0.4}Al_{0.6})Al_{1.8}O_4$; CeO_2 ; $ZrO_{1.97}$; (б).

Изучение микроструктуры является одним из главных средств исследования сплавов. Микроструктуру алюминиевого сплава $AlMg_{5.5}Li_{2.1}Zr_{0.15}$ типа дюралюмин, легированного 1,0 мас. % лантаном, исследовали на световом микроскопе марки Микроскоп КР-Л3230-2К. Методом микроструктурного анализа при увеличении 500 крат установлено влияние 1,0 мас. % лантана на микроструктуру алюминиевого сплава $AlMg_{5.5}Li_{2.1}Zr_{0.15}$ типа дюралюмин (Рис. 7).

Установлено, что добавки до 1,0 мас. % лантана как модификаторы структуры значительно измельчают микроструктуру исходного сплава, и она становится однородной и мелкозернистой.

Заключение

В настоящей работе изложены экспериментальные результаты, относящиеся к поведению алюминиевого сплава $AlMg_{5.5}Li_{2.1}Zr_{0.15}$ типа дюралюмин в газовой атмосфере, при высоких температурах. Исследования влияния лантана на окисляемость алюминиевого сплава $AlMg_{5.5}Li_{2.1}Zr_{0.15}$ типа дюралюмин показывают, что легирующая добавка лантана до 1,0 мас. % увеличивает окисление исходного сплава по механизму образования многокомпонентных оксидов типа шпинелей, которые не обладают достаточными защитными свойствами. При условии, что небольшие концентрации лантана в сплаве $AlMg_{5.5}Li_{2.1}Zr_{0.15}$ типа дюралюмин приводят к

незначительному росту окисления сплавов, такие соотношения можно считать целесообразными для работы изделий из этих сплавов при

невысоких температурах.

Оксиды легирующих компонентов (лантан), входя в состав оксидов защищаемого металла,

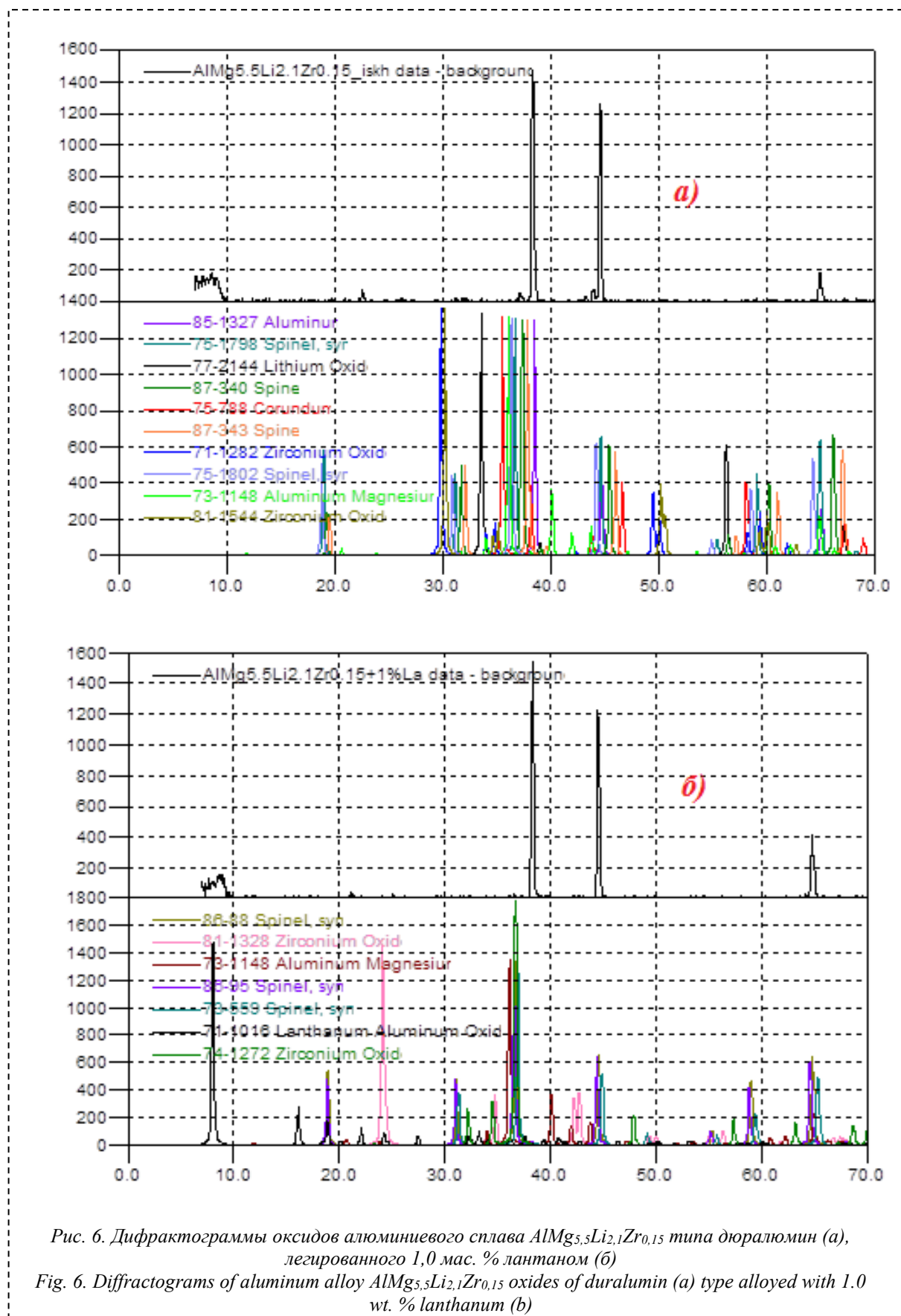


Рис. 6. Дифрактограммы оксидов алюминиевого сплава $\text{AlMg}_{5.5}\text{Li}_{2.1}\text{Zr}_{0.15}$ типа дюралюмин (а), легированного 1,0 мас. % лантаном (б)

Fig. 6. Diffractograms of aluminum alloy $\text{AlMg}_{5.5}\text{Li}_{2.1}\text{Zr}_{0.15}$ oxides of duralumin (a) type alloyed with 1.0 wt. % lanthanum (b)

затрудняют или облегчают диффузию ионов данного металла, тем самым влияя на общий процесс окисления. Если при этом скорость окисления определяется скоростью диффузии, то процесс подчиняется временному параболическому закону.

Показано влияние концентрации легирующего элемента в исходном сплаве на его окисление. В этом случае происходит образование интерметаллических фаз с более прочной связью и другой температурой плавления. Необходимо учесть также так называемый объемный фактор, т. е. если объем образующего оксида меньше, чем объем металла, тогда можно ожидать получения пористой, не сплошной пленки оксида. Именно такой механизм имеет место при легировании алюминиевого сплава $AlMg_{5,5}Li_{2,1}Zr_{0,15}$ типа дюралюмин с лантаном. Образующиеся с участием лантана как активного металла оксиды являются пористыми и увеличивают доступ кислорода к поверхности реагирования, в результате чего растет скорость окисления сплавов. Таким образом:

1) методом термогравиметрии исследовано влияние добавок лантана на кинетику высокотемпературного окисления $AlMg_{5,5}Li_{2,1}Zr_{0,15}$ типа дюралюмин при температурах 723, 773 и 823 К;

2) установлены основные кинетические и энергетические параметры окисления сплавов, с их помощью показано, что с ростом температуры и добавки лантана скорость окисления исходного сплава увеличивается;

3) методом РФА продуктов окисления сплавов установлено, что основными фазами являются $MgAl_2O_4$; Li_2O ; $(Mg_{0,4}Al_{0,6})Al_{1,8}O_4$; Al_2O_3 ; $(Mg_{0,4}Al_{0,6})Al_{1,8}O_4ZrO_2$; $MgAl_2O_4$;

4) анализ морфологии показал, что

измельчение микроструктуры исходного сплава при легировании его лантаном тем больше, чем больше содержание добавок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Квасов И. Ф., Фридляндер И. Н. Алюминиевые сплавы типа дюралюмин. М. : Металлургия, 1984. С. 222–224.
2. Алюминиевые сплавы. Промышленные деформируемые, спеченные и литейные алюминиевые сплавы: Справочное руководство. М. : Металлургия, 1972. С. 552.
3. Фридляндер И. Н., Шамрай В. Ф., Ширяева Н. В. Фазовый состав и механические свойства сплавов алюминия с магнием и литием // Известия АН СССР. Металлы. 1965. № 2. С. 153–158.
4. Брянцева В. И., Цхе Л. А., Бундже В. Г., Дунаев Ю. Д., Кирьяков Г. З. Электрохимия металлов и химия амальгам. Алма-Ата : Наука КазССР; 1969. С. 23–28.
5. Mayco international: official site. URL: <https://maycointernational.com/blog/what-are-cars-made-of/> (дата обращения: 09.01.2025).
6. Квасов Ф. И. Производство полуфабрикатов из легких сплавов за 50 лет Советской власти // Технология легких сплавов. 1967. № 5. С. 3–6.
7. Тарасенко Л. В., Колобнев Н. И., Хохлатова Л. Б. Фазовый состав и механические свойства сплавов системы $Al-Mg-Li-Me$ // Металловедение и термическая обработка металлов. 2008. № 2. С. 40–43.
8. Фридляндер И. Н. Современные алюминиевые, магниевые сплавы и композиционные материалы на их основе // Металловедение и термическая обработка металлов. 2002. № 7. С. 24–29.
9. Антипов В. В., Лавров Н. А., Сухоиваненко В. В., Сенаторова О. Г. Опыт

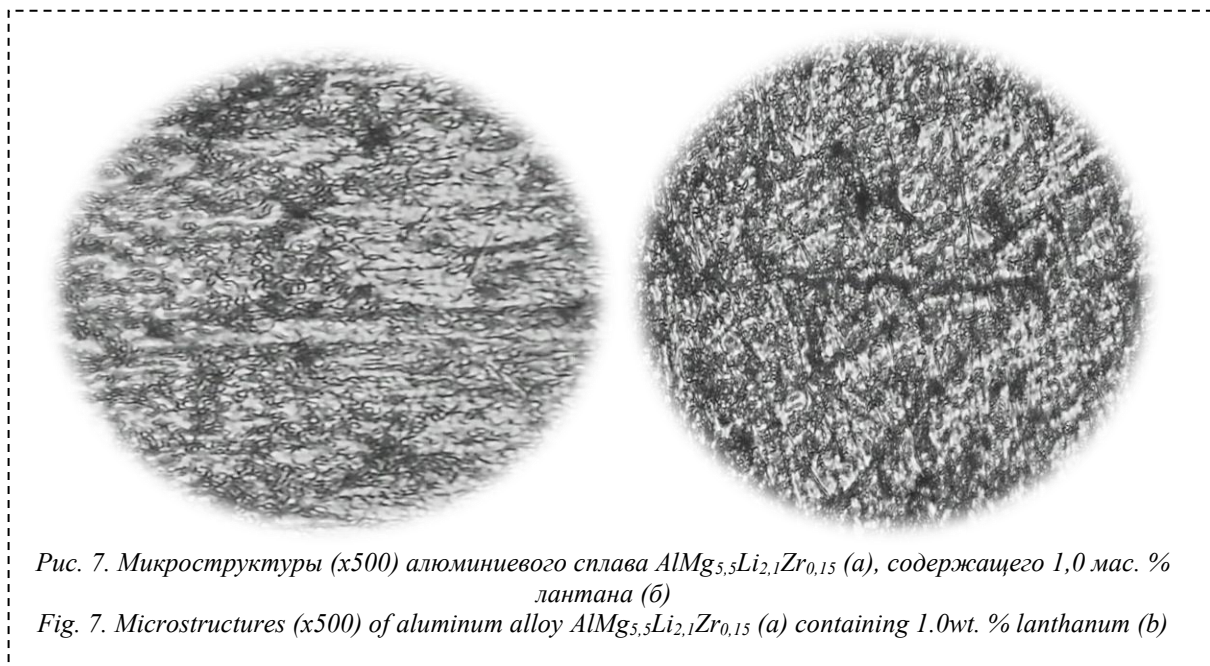


Рис. 7. Микроструктуры (x500) алюминиевого сплава $AlMg_{5,5}Li_{2,1}Zr_{0,15}$ (а), содержащего 1,0 мас. % лантана (б)

Fig. 7. Microstructures (x500) of aluminum alloy $AlMg_{5,5}Li_{2,1}Zr_{0,15}$ (a) containing 1.0wt. % lanthanum (b)

применения Al–Li-сплава 1441 и слоистых материалов на его основе в гидросамолетах // Цветные металлы. 2013. № 9. С. 46–50.

10. Прач Е. Л., Михайленков К. В. Разработка нового литейного сплава системы Al–Mg–Si–Mn с добавкой лития // Литейное производство. 2014. № 7. С. 13–15.

11. Шеметев Г. Ф. Алюминиевые сплавы: составы, свойства, применение. Учебное пособие по курсу «Производство отливок из сплавов цветных металлов». Часть I (Электронный ресурс). Санкт-Петербург. 2012. 155 с.

12. Фрейман Л. И., Макаров В. А., Брыксин И. Е. Потенциостатические методы в коррозионных исследованиях и электрохимической защите. Л.: Химия. 1972. 240 с.

13. Ганиев И. Н., Акбаров Ш. С., Худойбердизода С. У., Киреев С. Ю., Саидзода М. М. Коррозионная стойкость алюминиевого сплава AlMg5.5Li2.1Zr0.15 типа дюралюмин, легированного индием в растворе хлорида натрия // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2025. № 5 (171). С. 64–73.

14. Ганиев И. Н., Савдуллоева С. С., Худойбердизода С. У., Джайлоев Дж. Х., Халикова Л. Р., Махмудзода М. Анодное поведение алюминиевого сплава AlMg5.5Li2.1Zr0.15 типа дюралюмин, легированного празеодимом, в среде электролита NaCl // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. 2024. Т. 69. № 5. С. 33–38.

15. Ганиев И. Н., Саидов М. М., Файзуллоев У. Н., Худойбердизода С. У. Потенциостатическое исследование алюминиевого сплава AM4.5Mg1 типа дюралюмин с лантаном в среде водного раствора NaCl // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2024. № 1 (161). С. 23–33.

16. Киреев С. Ю., Синенкова С. Р., Киреева С. Н., Наумов Л. В., Козлов Г. В., Балыбердин А. С. Получение и свойства композиционных электрохимических покрытий индий-графит и никель-карбид вольфрама // Гальванотехника и обработка поверхности. 2024. Т. 32. № 1–2. С. 6–12.

17. Ганиев И. Н., Саидова Ф. Р., Худойбердизода С. У., Савдуллоева С. С., Джайлоев Дж. Х., Абулхаев В. Д. Анодное поведение алюминиевого сплава AlMg5.5Li2.1Zr0.15 легированного кальцием в среде электролита NaCl // Известия Санкт-

Петербургского государственного технологического института (технического университета). 2023. № 2. С. 37–41.

18. Худойбердизода С. У., Ганиев И. Н., Джайлоев Дж. Х., Киреев С. Ю., Янгуразова А. З., Кирилина Ю. Н., Муллоева М. Н. Коррозионная стойкость свинца, легированного медью, в растворе хлорида натрия // Практика противокоррозионной защиты. 2025. Т. 30. № 2. С. 56–63.

19. Ганиев И. Н., Савдуллоева С. С., Худойбердизода С. У., Джайлоев Дж. Х. Потенциостатическое исследование алюминиевого сплава AlMg5.5Li2.1Zr0.15 типа дюралюмин с лантаном в среде водного раствора NaCl // Практика противокоррозионной защиты. 2024. Т. 29. № 3. С. 41–49.

20. Ганиев И. Н., Саидова Ф. Р., Худойбердизода С. У., Джайлоев Дж. Х. Анодное поведение алюминиевого сплава AlMg5.5Li2.1Zr0.15 типа дюралюмин со стронцием в среде водного раствора NaCl // Гальванотехника и обработка поверхности. 2024. Т. 32. № 1–2. С. 13–19.

21. Худойбердизода С. У., Ганиев И. Н., Муллоева Н. М., Тоирзода М. А. Кинетика окисления свинцово-сурьмяного сплава SSu3, легированного теллуром, в твердом состоянии // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2025. № 3(106). С. 79–88.

22. Исмоилова М. Х., Ганиев И. Н., Отаджонов С. Э., Каюмова Ш. Б., Худойбердизода С. У. Особенности кинетики окисления на основе особо чистого алюминия сплава АК1 с бериллием в твердом состоянии // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2025. № 1 (104). С. 83–94.

23. Ganiev I. N., Khudoyberdizoda S. U., Savdulloeva S. S., Jayloev J. H., Khojanazarov Kh. M. Temperature dependence of heat capacity and thermodynamic functions of aluminum alloy AlMg5.5Li2.1Zr0.15 of duralumin type alloyed with praseodymium // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2025. Т. 98. № 3. С. 764–771.

24. Ganiev I. N., Jumaeva M. B., Khojanazarov Kh. M., Odinzoda H. O., Khudoyberdizoda S. U. Influence of zinc on the thermophysical properties and thermodynamic functions of lead babbitt B(PbSb15Sn10) // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2025. Т. 98. № 3. С. 757–763.

© 2026 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Худойбердизода Саидмири Убайдулло – к.т.н., ведущий научный сотрудник, Институт химии В. И. Никитина НАН Таджикистана, Республика Таджикистан, 734063, г. Душанбе, проспект Айни 299/2, e-mail: saidmir010992@mail.ru

Ганиев Изатулло Наврузович – академик НАН Таджикистана, д.х.н., проф., зав. Лабораторией «Коррозионностойкие материалы» Института химии В. И. Никитина НАН Таджикистана, Республика Таджикистан, 734063, г. Душанбе, проспект Айни 299/2, e-mail: ganievizatullo48@gmail.com

Савдуллоева Салима Савдуллоевна – научный сотрудник, Институт химии В. И. Никитина НАН Таджикистан, e-mail: salima10886@mail.ru

Джайлоев Джамшед Хусейнович – к.т.н., ведущий научный сотрудник ГНУ «Институт химии В. И. Никитина НАН Таджикистана», e-mail: husenzod85@mail.ru

Саидзода Масрур Мирзохон – д.т.н., доцент, Ректор Худжандского Международного Университета, e-mail: masrur.saidzoda88@mail.ru

Киреев Сергей Юрьевич – д.т.н., профессор, декан факультета промышленных технологий, электроэнергетики и транспорта, Пензенский государственный университет, ул. Красная, 40, 440026, Пенза, Пензенская область, Российская Федерация, e-mail: sergey58_79@mail.ru

Норова Муаттара Турдиевна – д.т.н., профессор, Таджикский национальный университет, Республика Таджикистан, Душанбе, проспект Рудаки, 17, e-mail: sergey58_79@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Худойбердизода Саидмири Убайдулло – курирование, подготовка необходимых документов для публикации, формулирование выводов.

Ганиев Изатулло Наврузович – разработка идеи, постановка исследовательской задачи, внесение правок.

Савдуллоева Салима Савдуллоевна – оформление статьи, произведение расчетов, работа с редакцией.

Джайлоев Джамшед Хусейнович – отливки сплавов и получение необходимых данных для подготовки публикации.

Саидзода Масрур Мирзохон – обзор более широкого круга литературы на выбранную тематику, сбор и анализ данных.

Киреев Сергей Юрьевич – обзор существующей литературы, научный менеджмент, критика, внесение правок вследствие вычитки.

Норова Муаттара Турдиевна – обзор существующей литературы, научный менеджмент, критика, внесение правок вследствие вычитки.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

KINETICS OF OXIDATION OF ALUMINUM ALLOY AlMg_{5.5}Li_{2.1}Zr_{0.15} TYPE DURALUMIN WITH LANTHANUM IN SOLID STATE

Saidmiri U. Khudoyberdizoda¹, Izatullo N. Ganiev¹, Salima S. Savdulloeva¹,
Jamshed H. Dzayloev¹, Masrour M. Saidzoda², Sergey Yu. Kireev³, Muattara T. Norova⁴

¹ Institute of Chemistry named after V.I. Nikitin Academy of Sciences

² Khujand International Institute of the International University of Tourism and Entrepreneurship of Tajikistan,

³ Polytechnic Institute of Penza State University

⁴ Tajik National University

* for correspondence: ganievizatullo48@gmail.com

**Article info**

Received:

05 November 2025

Accepted for publication:

15 May 2026

Abstract.

The study of high-temperature oxidation of aluminum alloys remains highly relevant due to the increasing demands on structural materials operating under extreme conditions in modern industries such as aerospace, energy, and nanomaterials production. Understanding oxidation kinetics enables the targeted development of materials with enhanced heat resistance and prolonged service life. This work investigates the effect of lanthanum alloying on the oxidation kinetics of the AlMg_{5.5}Li_{2.1}Zr_{0.15} type duralumin alloy in the solid state. Experimental studies were carried out using high-temperature thermogravimetry under isothermal conditions at temperatures of 723, 773,

Accepted:
11 June 2026

Published:
29 June 2026

Keywords: aluminum alloy
AlMg_{5.5}Li_{2.1}Zr_{0.15} type
duralumin, lanthanum,
thermogravimetric method,
oxidation kinetics, true oxidation
rate, apparent activation energy

and 823 K in an air atmosphere using an original continuous weighing setup. X-ray phase analysis (DRON-3M diffractometer) was used to examine the oxidation products, and metallographic methods with light microscopy were employed to assess the effect of the additive on morphology. Mathematical processing of kinetic data was performed with the construction of quadratic dependences, polynomial approximations, and oxidation isochrones. The evolution of the process rate depending on the concentration of the alloying element was analyzed. Kinetic oxidation curves were obtained, and the true oxidation rate and apparent activation energy of the process were determined. It was found that the addition of lanthanum up to 1.0 wt. % increases the oxidation rate of the alloy and reduces the apparent activation energy, which is associated with the formation of a porous multicomponent spinel-type oxide phase that facilitates oxygen diffusion. Microstructural analysis confirmed grain refinement and increased structural homogeneity upon lanthanum alloying, indicating its role as a structure modifier.

For citation: Khudoyberdizoda S.U., Ganiev I.N., Savdulloeva S.S., Dzayloev J.H., Saidzoda M.M., Kireev S.Yu., Norova M.T. Kinetics of oxidation of aluminum alloy AlMg_{5.5}Li_{2.1}Zr_{0.15} type duralumin with lanthanum in solid state. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2026; 2(174):77-89. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2026-2-77-89, EDN: UGJVAY

REFERENCES

1. Kvasov I.F., Fridlyander I.N. Alyuminiyevie splavi tipa duralumin. M.: Metallurgiya; 1984. Pp. 222–224.
2. Alyuminiyevie splavi. Promishlenniye seformiruemye, specheniye i liteyniye alyuminiyevie splavi: Spravochnoye rukovodstvo. M.: Metallurgiya; 1972. P. 552.
3. Fridlyander I.N., Shamray V.F., Shiryayeva N.V. Phase composition and mechanical properties of aluminum alloys with magnesium and lithium. *Izvestiya AN SSSR. Metall.* 1965; 2:153–158.
4. Bryanseva V.I., Skhe L.A., Bundzhe V.G., Dunayev Yu.D., Kiryakov G.Z. Elektrokhiimiya metallov i khimiya amalgam. Alma-Ata: Nauka KazSSR; 1969. Pp. 23–28.
5. Mayco international: official site. URL: <https://maycointernational.com/blog/what-are-cars-made-of/> (дата обращения: 09.01.2025).
6. Kvasov F.I. Proizvodstvo polufabrikatov iz lyogkikh splavov za 50 let Sovetskoy vlasti. *Tekhnologiya lyogkikh splavov.* 1967; 5:3–6.
7. Tarasenko L.V., Kolobnyov N.I., Khokhlatova L.B. Fazoviy sostav i mekhanicheskkiye svoystva splavov sistemi Al–Mg–Li–Me. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov.* 2008; 2:40–43.
8. Fridlyander I.N. Sovremenniye alyuminiyevkiye, magniyevkiye splavi i kompozitsionniye materialy na ikh osnove. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov.* 2002; 7:24–29.
9. Antipov V.V., Lavrov N.A., Sukhoivanenko V.V., Senatorova O.G. Opit primeneniya Al–Li-splava 1441 i sloistikh materialov na yego osnove v gidrosamolyotakh. *Svetniye metalli.* 2013; 9:46–50.
10. Prach E.L., Mikhaylenkov K.V. Razrabotka novogo liteynogo splava sistemi Al–Mg–Si–Mn s dobavkoy litiya. *Liteynoye proizvodstvo.* 2014; 7:13–15.
11. Shemetev G.F. Alyuminiyevie splavi: sostavi, svoystva, primeneniye. Uchebnoye posobiye po kursu «Proizvodstvo otlivok iz splavov svetnikh metallov». Chast I (Elektronniy resurs). Sankt-Peterburg. 2012. 155 p.
12. Freyman L.I., Makarov V.A., Briksin I.E. Potentsiosticheskoye Metodi v korrozionnikh issledovaniyakh i elektrokhimicheskoy zashite. L. : Khimiya; 1972. 240 p.
13. Ganiev I.N., Akbarov Sh.S., Khudoyberdizoda S.U., Kireev S.Yu., Saidzoda M.M. Korroziionnaya stoykost alyuminiyevogo splava AlMg_{5.5}Li_{2.1}Zr_{0.15} tipa duralumin, legirovannogo indiyem, v rastvore khlorida natriya. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta.* 2025; 5(171):64–73.
14. Ganiev I.N., Savdulloyeva S.S., Khudoyberdizoda S.U., Dzhayloyev Dzh.H., Khalikova L.R., Makhmudzoda M. Anodnoye povedeniye alyuminiyevogo splava AlMg_{5.5}Li_{2.1}Zr_{0.15} tipa duralumin, legirovannogo prazeodimom, v srede elektrolita NaCl. *Izvestiya visshukh uchebnikh zavedeniy. Tekhnologiya lyogkoy promishlennosti.* 2024; 69(5)33–38.
15. Ganiev I.N., Saidov M.M., Fayzulloev U.N., Khudoyberdizoda S.U. Potentsiosticheskoye issledovaniye alyuminiyevogo splava AM4.5Mg1 tipa duralumin s lantanom v srede vodnogo rastvora NaCl. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta.* 2024; 1(161):23–33.
16. Kireev S.Yu., Sinenkova S.R., Kireeva S.N., Naumov L.V., Kozlov G.V., Balyberdin A.S. Poluchenie i svoystva kompozitsionnikh elektrokhimicheskikh pokritiy indiy-grafit i nikel-karbid volframa. *Galvanotekhnika i obrabotka poverkhnosti.* 2024; 32(1–2):6–12.
17. Ganiev I.N., Saidova F.R., Khudoyberdizoda S.U., Savdulloeva S.S., Dzhayloev J.H., Abulkhaev V.D. Anodic behavior of aluminum alloy AlMg_{5.5}Li_{2.1}Zr_{0.15} alloyed with calcium in NaCl electrolyte. *Proceedings of the St. Petersburg State Technological Institute (Technical University).* 2023; 2:37–41.
18. Khudoyberdizoda S.U., Ganiev I.N., Dzjayloev J.H., Kireev S.Yu., Yanguzarova A.Z., Kirilina

Yu.N., Mulloyeva M.N. Korroziionnaya stoykost svinsa, legirovannogo medyu, v rastvore khlorida natriya. *Praktika protivokorroziionnoy zashiti*. 2025; 30(2):56–63.

19. Ganiev I.N., Savdulloeva S.S., Khudoiberdizoda S.U., Dzhayloev J.H. Potentsiostaticheskoye issledovaniye alyuminiyevogo splava AlMg5.5Li2.1Zr0.15 tipa duralyumin s lantanom v srede vodnogo rastvora NaCl. *Praktika protivokorroziionnoy zashiti*. 2024; 29(3):41–49.

20. Ganiev I.N., Saidova F.R., Khudoiberdizoda S.U., Dzhayloev J.H. Anodnoye povedeniye alyuminiyevogo splava AlMg5.5Li2.1Zr0.15 tipa dyuralyumin so stronsiyem v srede vodnogo rastvora NaCl. *Galvanotekhnika i obrabotka poverkhnosti*. 2024; 32:1–2:13–19.

21. Khudoiberdizoda S.U., Ganiev I.N., Mulloeva N.M., Toirzoda M.A. Kinetika okisleniya svinsovo-surmyanogo splava SSu3, legirovannogo tellurom, v tvyordom sostoyanii. *Vestnik Saratovskogo gosudarsvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2025; 3(106):79–88.

22. Ismoilova M.H., Ganiev I.N., Otadzhonov S.E., Kayumova Sh.B., Khudoiberdizoda S.U. Osobennosti kinetiki okisleniya na osnove osobo chistogo alyuminiya splava AK1 s berilliyem v tvyordom sostoyanii. *Vestnik Saratovskogo gosudarsvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2025; 1(104):83–94.

23. Ganiev I.N., Khudoiberdizoda S.U., Savdulloeva S.S., Jayloev J.H., Khojanazarov Kh.M. Temperature dependence of heat capacity and thermodynamic functions of aluminum alloy AlMg5.5Li2.1Zr0.15 of duralumin type alloyed with praseodymium. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2025; 98:3:764–771.

24. Ganiev I.N., Jumaeva M.B., Khojanazarov Kh.M., Odiazoda H.O., Khudoiberdizoda S.U. Influence of zinc on the thermophysical properties and thermodynamic functions of lead babbitt B(PbSb15Sn10). *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2025; 98(3):757–763.

© 2026 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).
The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

Saidmiri U. Khudoiberdizoda – Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher at the V.I. Nikitin Institute of Chemistry of the National Academy of Sciences of Tajikistan, Republic of Tajikistan, 734063, Dushanbe, Aini Avenue 299/2, e-mail: saidmir010992@mail.ru

Izatullo N. Ganiev – Academician of the National Academy of Sciences of Tajikistan, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Head. Laboratory "Corrosion-resistant Materials" of the V.I. Nikitin Institute of Chemistry of the National Academy of Sciences of Tajikistan, Republic of Tajikistan, 734063, Dushanbe, Aini Avenue 299/2, e-mail: ganievizatullo48@gmail.com

Salima S. Savdulloeva – Researcher at the V.I. Nikitin Institute of Chemistry of the National Academy of Sciences of Tajikistan, e-mail: salima10886@mail.ru

Jamshed H. Dzhayloev – Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher at the V.I. Nikitin Institute of Chemistry of the National Academy of Sciences of Tajikistan, e-mail: husenzod85@mail.ru

Masrur M. Saidzoda – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Rector of Khujand International University, e-mail: masrur.saidzoda88@mail.ru

Sergey Yu. Kireev – Doctor of Technical Sciences, Professor, Dean of the Faculty of Industrial Technologies, Electric Power Industry and Transport, Penza State University, Krasnaya str., 40, 440026, Penza, Penza Region, Russian Federation, e-mail: sergey58_79@mail.ru

Muattara T. Norova – Doctor of Technical Sciences, Professor, Tajik National University, 17 Rudaki Avenue, Dushanbe, Republic of Tajikistan, e-mail: sergey58_79@mail.ru

Contribution of the authors:

Saidmiri U. Khudoiberdizoda – supervision, preparation of necessary documents for publication, formulation of conclusions.

Izatullo N. Ganiev – developing an idea, setting a research task, making edits.

Salima S. Savdulloeva – design of the article, making calculations, working with the editorial staff.

Jamshed H. Dzhayloev – casting alloys and obtaining the necessary data for the preparation of the publication.

Masrur M. Saidzoda – an overview of a wider range of literature on a selected topic, data collection and analysis.

Sergey Yu. Kireev – review of existing literature, scientific management, criticism, making corrections due to proofreading.

Muattara T. Norova – review of existing literature, scientific management, criticism, making corrections due to proofreading.

.All authors have read and approved the final manuscript.

