

ISSN 1999-4125 (Print)

ISSN 2949-0642 (Online)

Научная статья

УДК 669.017:620.197

DOI: 10.26730/1999-4125-2026-2-67-76

АНОДНОЕ ПОВЕДЕНИЕ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА $AlMg_5.5Li_2.1Zr_0.15$ ТИПА ДЮРАЛЮМИН, ЛЕГИРОВАННОГО ЦЕРИЕМ В СРЕДЕ ЭЛЕКТРОЛИТА $NaCl$

Худойбердизода Саидмири Убайдулло¹, Ганиев Изатулло Наврузович¹,
Савдуллоева Салима Савдуллоевна¹, Джайлоев Джамшед Хусейнович¹,
Саидзода Масрур Мирзохон², Киреев Сергей Юрьевич³,
Норова Муатгара Турдиевна⁴

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
 $AlMg_5.5Li_2.1Zr_0.15$ типа
дюралюмин,
потенциостатический метод,
церий, электролит $NaCl$,
скорость коррозии, потенциал
свободной коррозии,
потенциал
питтингообразования

Аннотация.

Широкое применение дюралюмина в авиационной, транспортной и других отраслях промышленности обусловлено его высокими прочностными характеристиками, низкой плотностью и хорошей технологичностью при литье и обработке давлением. Этот сплав относится к классу структурных материалов на основе алюминия, упрочненных добавками меди, марганца, магния и лития. Его эксплуатационные свойства во многом определяются режимами термической обработки и составом легирующих элементов. Одним из ключевых факторов, ограничивающих долговечность дюралюмина в агрессивных средах, является склонность к локальной коррозии, в частности к питтингу, который в пресных водах оценивается прежде всего по глубине поражения. Сплав дюралюминий широко применяется в авиационной, при производстве скоростных поездов (например, поездов Синкансэн) и во многих других отраслях машиностроения, так как отличается существенно большей прочностью, чем чистый алюминий. Наряду с высокими эксплуатационными свойствами разнообразное применение дюралюминия обусловлено его высокой технологичностью, что создает предпосылки для получения изделий всеми известными методами литья и пластической обработки. Дюралюминий относится к категории конструкционных сплавов, которые отличаются повышенной прочностью. Основу их составляет алюминий. В качестве добавок используют медь, марганец, магний в разных процентных соотношениях. Свойства дюралюминия зависят от термической обработки и количества добавленных легирующих элементов. В работе приведены результаты исследования влияния церия на анодное поведение алюминиевого сплава $AlMg_5.5Li_2.1Zr_0.15$ типа дюралюмин в среде электролита $NaCl$. Исследование коррозионно-электрохимического поведения сплавов проведено потенциостатическим методом в потенциодинамическом режиме со скоростью развертки потенциала $2 мВ \cdot с^{-1}$. Показано, что добавки церия снижают скорость анодной коррозии исходного сплава $AlMg_5.5Li_2.1Zr_0.15$ на 20-30%. Установлено, что увеличение концентрации хлорид-иона способствует росту скорости анодной коррозии независимо от содержания церия в сплаве $AlMg_5.5Li_2.1Zr_0.15$ типа дюралюмин.

Для цитирования: Худойбердизода С.У., Ганиев И.Н., Савдуллоева С.С., Джайлоев Д.Х., Саидзода М.М., Киреев С.Ю., Норова М.Т. Анодное поведение алюминиевого сплава AlMg5.5Li2.1Zr0.15 типа дюралюмин, легированного церием в среде электролита NaCl // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2026. № 2 (174). С. 67-76. DOI: 10.26730/1999-4125-2026-2-67-76, EDN: TYUCZA

Введение

Сплавы из алюминия по способу изготовления из них изделий подразделяются на две группы:

- 1) деформируемые (имеют высокую пластичность в нагретом состоянии);
- 2) литейные (имеют хорошую жидкотекучесть).

Такое подразделение отражает основные технологические свойства и направления использования сплавов. Для придания этих свойств в алюминий добавляют различные легирующие элементы в разных количествах [1, 2].

Легирование – процесс улучшения физико-механических свойств главного компонента путем внедрения в расплав прочих компонентов. Легирование – общий термин, объединяющий совокупность технологических операций, направленных на повышение качества выпускаемой металлургической продукции, проводимых на различных стадиях производства металлического изделия. Внедрение разнообразных легирующих добавок в алюминий значительно меняет его свойства в лучшую сторону, а иногда придает ему новые специфические параметры [3].

Чистый алюминий зачастую не отвечает современным стандартам прочности металлов, поэтому для изготовления различных элементов технологического оборудования для промышленных целей используют не чистый металл, а его сплавы.

Легирование с использованием различных добавок позволяет повысить прочность, твердость, увеличиваются границы температурного воздействия и прочие свойства. Однако происходит и нежелательные изменения: наблюдается уменьшение электропроводности, часто падает стойкость к коррозии, а также повышается относительная плотность. Исключением является легирование марганцем, при добавлении которого коррозионная стойкость становится еще выше, и магнием, который также увеличивает сопротивляемость коррозии (добавка не должна превышать 3%) и снижает показатель плотности, так как он легче алюминия [4].

Термическая обработка дюралюминия состоит из нескольких этапов. Сначала его нагревают выше линии предельной растворимости (обычно приблизительно до 500°C). При такой температуре его состав являет собой однородный твердый расплав меди в

алюминии. Далее металл закаляют, быстро погружая в воду, после происходит фиксация в нормальных условиях. При этом раствор получается пересыщенным. Далее некоторое время дюралюминий остается мягким и пластичным [5–8].

Далее происходит процесс естественного старения. После закалки даже дюралюминий обладает нестабильной структурой, в которой происходят самопроизвольные изменения даже в условиях комнатной температуры. Избыток атомов меди группируется в растворе стремясь принять расположение, наиболее близкое к естественному порядку для кристаллов химического соединения CuAl. В твердом растворе происходят искажения из-за неупорядоченного расположения атомов кристаллической решетки, однако образование химического соединения и отделение от твердого раствора еще не происходят, эти искажения вызывают значительное повышение твердости и плотности с одновременным падением пластичных свойств сплава.

В первые часы процесс естественного старения металла происходит наиболее интенсивно, далее постепенно замедляется и полностью завершается, со временем приобретая максимальный показатель прочности. Данный процесс можно существенно ускорить, нагрев сплав до 100-150 °С, однако показатели прочности в этом случае будут заметно ниже, это называется искусственным старением. Повышенная температура ускоряет диффузионные сдвиги атомов меди, что приводит к полному выделению фазы CuAl из твердого раствора. Естественное старение при комнатной температуре происходит медленнее, однако ценится более высоко за счет больших показателей прочности у готовой продукции.

Результаты исследований показывают, что максимальные показатели упрочнения при естественном старении дюралюминия достигаются в течение четырех дней. Наибольшее распространение среди неупрочняемых алюминиевых сплавов имеют системы на основе Al-Mn и Al-Mg.

С понижением температуры способность к растворению в алюминии марганца и магния, которая и так достаточно ограничена, сильно падает и при обработке температурой не показывают высоких показателей упрочнения. Объясняется это следующим образом. В ходе кристаллизации при производстве сплавов с содержанием до 1,9% Mn из избытков марганца

должно образовываться растворимое в первом, но не растворимое в алюминии химическое соединение Al (MnFe). Следовательно, последующий нагрев выше линии предельной растворимости не обеспечивает образование однородного твердого раствора, сплав остается равнофазным, что делает невозможным процесс последующей закалки и старения, так как сплав состоит частиц Al (MnFe) и твердого раствора [9–11].

Низкие показатели упрочнения в случае системы Al-Mg при температурной обработке возникают по другой причине. Если содержание магния в алюминии не превышает 1,4%, процесс упрочнения не может иметь места по причине того, что в этой степени растворение происходит при комнатной температуре, и выделение избыточных фаз никак не происходит. Если увеличить добавку магния, при закалке с последующим химическим старением будет в избытке выделяться фаза, состоящая из соединения MgAl.

Целью настоящей работы является исследование влияние добавки церия на коррозионно-электрохимическое поведение алюминиевого сплава AlMg5.5Li2.1Zr0.15 типа дюралюмин.

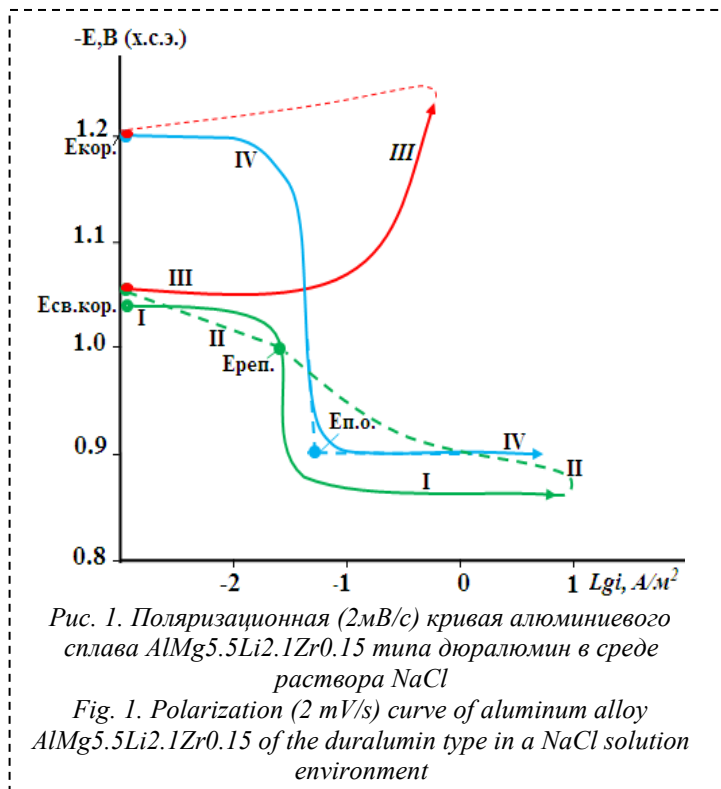
Экспериментальная часть

Сплавы для исследования получали из алюминия марки А5N (ГОСТ 11069-2011), магний (ГОСТ 804-93), литий (ГОСТ 8775.0-87), цирконий (ГОСТ 25278.10-82), церий (ГОСТ 12364-84). В шахтных лабораторных печах типа СШОЛ предварительно синтезировали лигатуры

алюминия с 10 мас. % церием. Шихтовку сплавов проводили с учетом угара церия и магния. Исследованиям подвергали сплавы, масса которых отличалась от массы шихты не более чем на 2% отн. В графитовой изложнице из полученных сплавов отливали цилиндрические образцы диаметром 8 мм, длиной 140 мм для исследования коррозионных свойств. Торцевая часть образцов служила рабочим электродом.

Электрохимические исследования проводились потенциостатическим методом на потенциостате ПИ-50.1.1. Скорость развертки потенциала равнялась 2 мВ/с. Исследования проводили в нейтральной среде электролита NaCl. Сигнал от прибора передавался на программатор ПР-8 и сохранялся на ЛКД-4. Образцы сплавов перед началом электрохимических измерений выдерживались до достижения стационарного потенциала, или потенциала свободной коррозии $E_{св.кор.}$, значения которого устанавливались по зависимости потенциал (E, В) – время (t, мин.) в течение 1-го часа выдержки в растворе хлорида натрия. Установившееся значение $E_{св.кор.}$ сплавов подтверждается более длительной выдержкой в течении 1-3 сут [12–16].

На Рис. 1 приведена последовательность снятия полной поляризационной кривой для алюминиевого сплава AlMg5.5Li2.1Zr0.15 типа дюралюмин в среде электролита 3,0%-ного NaCl. На кривой обозначены координаты основных электрохимических потенциалов сплава. При электрохимических исследованиях образцы



поляризовали в положительном направлении, исходя от потенциала, установившегося (потенциал свободной коррозии или стационарного $E_{св.кор.}$) до значения потенциала, при котором происходит резкое возрастание плотности тока до 1 A/m^2 (Рис. 1, кривая I). Образцы далее поляризовали в обратном направлении (до значения потенциала $-1,2\text{В}$) (Рис. 1, кривые II и III), что позволило подщелачивать приэлектродную поверхность образца и снять оксидную пленку с его поверхности. Под конец образцы снова поляризовали в положительном направлении (Рис. 1, кривая IV). При таком переходе фиксируется потенциал питтингообразования ($E_{п.о.}$).

По ходу прохождения полной поляризационной кривой определяли следующие электрохимические параметры:

- $E_{ст.}$ или $-E_{св.кор.}$ – стационарный потенциал или потенциал свободной коррозии;
- $E_{кор.}$ – потенциал коррозии;

- $E_{п.о.}$ – потенциал питтингообразования;
- $E_{рп.}$ – потенциал репассивации;
- $i_{кор.}$ – ток коррозии.

Процесс коррозии алюминиевого сплава AlMg5.5Li2.1Zr0.15 типа дюралюмин контролировался катодной реакцией ионизации кислорода в нейтральной среде, в связи с чем ток коррозии рассчитывался с учетом тафельской

константы ($b_k = 0.122$ В) из катодной ветви потенциодинамических кривых. Скорость коррозии, являющаяся функцией тока коррозии, определялась по формуле:

$$K = i_{корр.} \cdot k,$$

где k – электрохимический эквивалент алюминия, среднее значение которого составляет 0,335 г/А·ч. В работах [12–16] описана подробная методика исследования коррозионно-

Таблица 1. Временная зависимость потенциала (х.с.э.) свободной коррозии ($E_{св.кор.}$, В) алюминиевого сплава AlMg5.5Li2.1Zr0.15 типа дюралюмин от содержания церия в среде электролита 3,0%- ного NaCl

Table 1. Time dependence of the potential (h.s.e.) of free corrosion ($E_{free.cor.}$, V) of aluminum alloy AlMg5.5Li2.1Zr0.15 of the duralumin type on the cerium content in an electrolyte environment of 3.0% NaCl

Время выдержки, минут	Содержание церия, мас. %				
	0.0	0.01	0.1	0.5	1.0
0	1,221	1,106	1,085	1,075	1,067
0,15	1,207	1,094	1,074	1,067	1,058
0,2	1,193	1,083	1,065	1,058	1,049
0,3	1,177	1,072	1,058	1,050	1,040
0,4	1,160	1,062	1,051	1,041	1,032
0,5	1,145	1,053	1,044	1,033	1,024
0,6	1,134	1,045	1,037	1,025	1,016
2	1,123	1,038	1,030	1,018	1,008
3	1,111	1,031	1,023	1,011	1,001
4	1,100	1,024	1,016	1,004	0,994
5	1,088	1,017	1,009	0,997	0,987
10	1,077	1,011	1,003	0,990	0,981
20	1,068	1,006	0,997	0,985	0,975
30	1,060	1,002	0,992	0,980	0,970
40	1,053	0,998	0,988	0,977	0,966
50	1,047	0,995	0,984	0,974	0,962
60	1,043	0,995	0,984	0,973	0,962

Таблица 2. Коррозионно-электрохимические характеристики алюминиевого сплава AlMg5.5Li2.1Zr0.15 типа дюралюмин с церием, в среде электролита NaCl

Table 2. Corrosion-electrochemical characteristics of aluminum alloy AlMg5.5Li2.1Zr0.15 of the duralumin type with cerium, in the NaCl electrolyte environment

Среда NaCl	Содержание церия в сплаве	Электрохимические потенциалы, В (х.с.э.)				Скорость коррозии	
		$-E_{св.кор.}$	$-E_{кор.}$	$-E_{п.о.}$	$-E_{рп.}$	$i_{кор.} \cdot 10^2, \text{ А/м}^2$	$K \cdot 10^3, \text{ г/м}^2 \cdot \text{ч}$
мас. %							
0,03	-	0.790	1.000	0.670	0.740	7.1	23.78
	0.01	0.750	0.961	0.627	0.706	6.5	21.77
	0.1	0.740	0.952	0.618	0.698	6.3	21.10
	0.5	0.729	0.943	0.609	0.690	6.1	20.43
	1.0	0.719	0.934	0.600	0.682	5.9	19.76
3,0	-	1.043	1.200	0.900	1.000	10.9	36.51
	0.01	0.995	1.148	0.858	0.965	10.3	34.50
	0.1	0.984	1.139	0.849	0.956	10.1	33.83
	0.5	0.973	1.130	0.840	0.947	9.9	33.16
	1.0	0.962	1.121	0.831	0.938	9.7	32.49

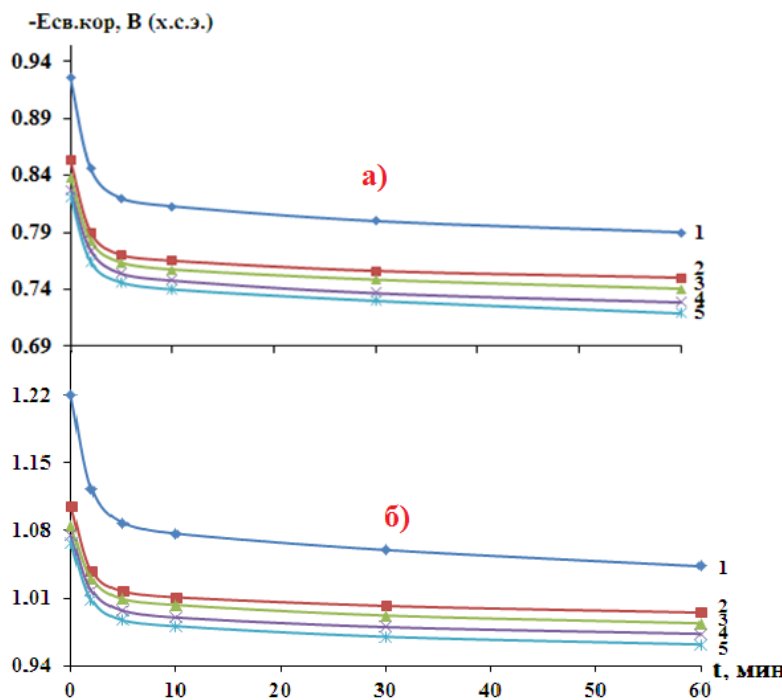


Рис. 2. Временная зависимость $-E_{св.кор.}$ алюминиевого сплава $AlMg5.5Li2.1Zr0.15$ (1) типа дюралюмин с церием, мас. %: 0,01(2); 0,1(3); 0,5(4); 1,0(5), в среде электролита 0,03% (а) и 0,3%-ного (б) NaCl

Fig. 2. Time dependence of $-E_{free\ cor.}$ aluminum alloy $AlMg5.5Li2.1Zr0.15$ (1) of the duralumin type with cerium, wt. %: 0.01 (2); 0.1 (3); 0.5 (4); 1.0 (5), in an electrolyte environment of 0.03% (a) and 0.3% (b) NaCl

электрохимического поведения сплавов.

Результаты электрохимических исследований легированного церием алюминиевого сплава $AlMg5.5Li2.1Zr0.15$ типа дюралюмин представлены на Рис. 2–5 и в Таблицах 1, 2. Из Рис. 2 и Таблицы 1 вытекает, что по мере разбавления электролита NaCl $E_{св.кор.}$ смещается в область положительных значений, особенно в первые 5–10 минут от начала погружения электрода в раствор. Стабилизация $E_{св.кор.}$ происходит после 20–40 минут от начала погружения электрода в раствор. Данная зависимость свидетельствует о пассивации поверхности образца в результате формирования защитной оксидной пленки. Например, после одного часа выдержки в среде электролита 0,03 %-ного NaCl $E_{св.кор.}$ нелегированного сплава составляет $-1,043$ В, а у сплава, содержащего 1,0 мас. % церия $E_{св.кор.}$ равняется $-0,962$ В [17–20].

Анодное поведение алюминиевого сплава $AlMg5.5Li2.1Zr0.15$ типа дюралюмин с церием исследовалось в среде с различной концентрацией электролита NaCl. Результаты исследования сплавов представлены в Таблице 2. Как показывают результаты исследования, с ростом концентрации хлорид-иона в электролите NaCl $E_{св.кор.}$ и $E_{п.о.}$ легированных сплавов

уменьшаются. Это указывает на снижение устойчивости сплавов при воздействии на них хлорид-иона.

Легирование церием до 1,0 мас. % сплава $AlMg5.5Li2.1Zr0.15$ снижает скорость его коррозии примерно на 20%. Такое влияние церия на скорость коррозии исходного сплава характерно для трех исследованных сред NaCl. Рост концентрации хлорид-иона приводит к увеличению скорости коррозии сплавов (Таблица 2). На рис. 3 приведены анодные поляризационные кривые сплава $AlMg5.5Li2.1Zr0.15$ типа дюралюмин с церием в среде электролита NaCl. Видно, что кривые, относящиеся к сплавам с церием, находятся левее кривой исходного сплава. Торможение процесса анодного растворения сплава $AlMg5.5Li2.1Zr0.15$ типа дюралюмин с церием вызывает уменьшение скорости его коррозии. Пассивная оксидная пленка на

алюминии разрушается в нейтральных растворах в присутствии иона хлора. В результате этого возникает питтинговая коррозия.

На Рис. 4 представлена графическая зависимость скорости коррозии алюминиевого сплава $AlMg5.5Li2.1Zr0.15$ типа дюралюмин от содержания церия в нем в среде электролита NaCl различной концентрации. Добавки церия во всех изученных средах способствуют снижению скорости коррозии исходного алюминиевого сплава.

Зависимость плотности тока коррозии алюминиевого сплава $AlMg5.5Li2.1Zr0.15$ типа дюралюмин с церием показана на Рис. 5. Легирование церием снижает величину плотности тока коррозии исходного алюминиевого сплава $AlMg5.5Li2.1Zr0.15$ типа дюралюмин. С ростом концентрации хлорид-иона в электролите NaCl наблюдается рост плотности тока коррозии сплавов независимо от содержания церия в них.

Заключение

Представлены обобщенные результаты исследования анодного поведения алюминиевого сплава $AlMg5.5Li2.1Zr0.15$ типа дюралюмин с церием. С ростом концентрации церия в сплаве $AlMg5.5Li2.1Zr0.15$ типа дюралюмин потенциал

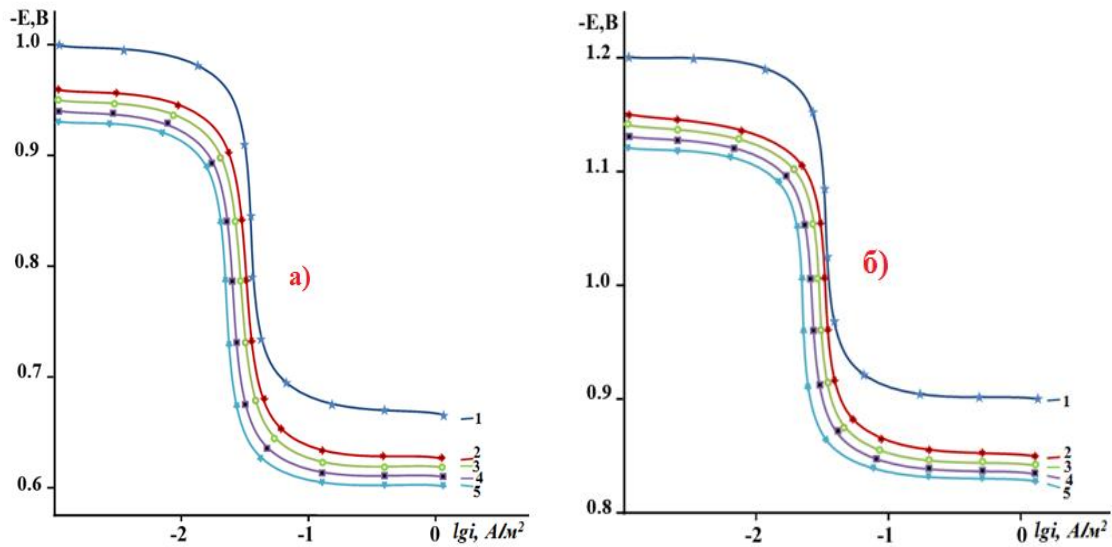


Рис. 3. Анодные поляризационные (2 мВ/с) кривые сплава $AlMg5.5Li2.1Zr0.15$ (1), содержащего церия, мас. %: 0.01(2); 0.1(3); 0.5(4); 1.0(5), в среде электролита 0,03% (а) и 3,0 %-ного (б) $NaCl$
 Fig. 3. Anodic polarization (2 mV/s) curves of the $AlMg5.5Li2.1Zr0.15$ alloy (1) containing cerium, wt. %: 0.01(2); 0.1(3); 0.5(4); 1.0(5), in an electrolyte environment of 0.03% (a) and 3.0% (b) $NaCl$

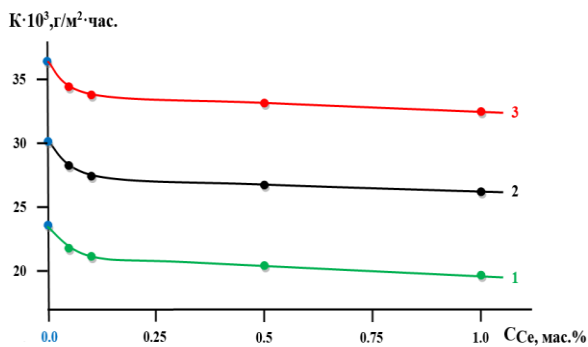


Рис. 4. Зависимость скорости коррозии алюминиевого сплава $AlMg5.5Li2.1Zr0.15$ типа дюралюмин (1) с церием, мас. %: 0,05(2); 0,1(3); 0,5(4); 1,0(5) в среде электролита $NaCl$
 Fig. 4. Dependence of the corrosion rate of aluminum alloy $AlMg5.5Li2.1Zr0.15$ of the duralumin type (1) with cerium, wt. %: 0.05(2); 0.1(3); 0.5(4); 1.0(5) in the $NaCl$ electrolyte environment

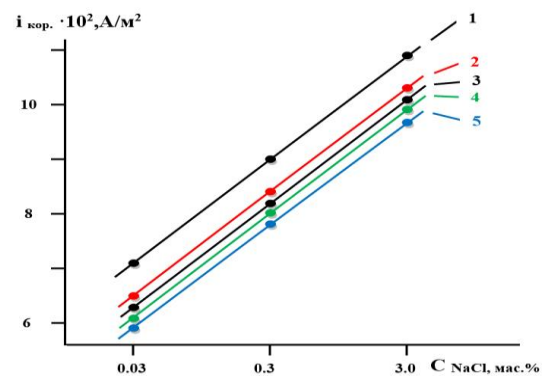


Рис. 5. Зависимость плотности тока коррозии алюминиевого сплава $AlMg5.5Li2.1Zr0.15$ типа дюралюмин (1) с церием, мас. %: 0,05(2); 0,1(3); 0,5(4); 1,0(5) от концентрации электролита $NaCl$
 Fig. 5. Dependence of the corrosion current density of the aluminum alloy $AlMg5.5Li2.1Zr0.15$ of the duralumin type (1) with cerium, wt. %: 0.05(2); 0.1(3); 0.5(4); 1.0(5) on the concentration of the electrolyte $NaCl$

коррозии смещается в положительном направлении оси ординат. При переходе от слабого электролита $NaCl$ к сильному наблюдается уменьшение величины потенциала свободной коррозии независимо от содержания легирующего компонента. Рост концентрации легирующего компонента способствует увеличению величины потенциалов питтингообразования и репассивации во всех средах независимо от концентрации электролита $NaCl$.

С ростом концентрации электролита $NaCl$ увеличивается плотность тока коррозии и, соответственно, скорость коррозии алюминиевого сплава $AlMg5.5Li2.1Zr0.15$ типа дюралюмин с церием и уменьшаются потенциалы свободной коррозии, питтингообразования и репассивации сплавов.

Таким образом, установлено, что анодная устойчивость повышается на 15-20% при легировании церием до 1.0 мас. % алюминиевого сплава $AlMg5.5Li2.1Zr0.15$ типа дюралюмин в среде электролита $NaCl$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белецкий В. М., Кривов Г. А. Алюминиевые сплавы. Состав, свойства, технология, применение Справочник. Под общ. ред. акад. Фридляндера И. Н. Киев : КОМИНТЕХ, 2005. 365 с.
2. Рындина Н. В. Цветные и драгоценные металлы и их сплавы. М. : Высшая школа. 2008. 193 с.
3. Кишкина С. И. Сопротивление разрушению алюминиевых сплавов. М. : Metallurgy, 1981. 280 с.
4. Герасименко А. А., Александров Я. И., Андреев И. Н. [и др.] Защита от коррозии, старения и биоповреждений машин, оборудования и сооружений: Справочник. М. : Машиностроение, 1987. 784 с.
5. Кузнецов Ю. И., Розенфельд И. Л., Филимонова Г. В., Линичук Т. В. Исследование влияния ингибирующих анионов на питтингообразование сплава Д16 в растворах, хлоридов // Защита металлов. 1978. Т. 14. № 6. С. 653–661.
6. Розенфельд И. Л., Кузнецов Ю. И., Кербелева И. Я. Защита алюминиевого сплава Д16 при повышенных температурах в минерализованной воде. В сб.: Исследования по электрохимии и коррозии металлов. Тула : ТЛИ, 2006. 47 с.
7. Shikun X., Rongxi Y., Zhi G., Xiang X., Chagen H., and Xiuyan G. Effects of Rare Earth Ce on Casting Properties of Al-4.5Cu Alloy, Adv // Mater. Res. 2010. № 136. Pp. 1–4.
8. Chaubey A. K., Mohapatra S., Jayasankar K., Pradhan S. K., Satpati B., Sahay S. S., Mishra B. K., Mukherjee P. S. Effect of cerium addition on microstructure and mechanical properties of Al-Zn-Mg-Cu alloy // Transactions of The Indian Institute of Metals. 2009. Vol. 62. Iss. 6. Pp. 539–543.
9. Gröbner J., Mirkovic D., Schmid-Fetzer R. Thermodynamic Aspects of the Constitution, Grain Refining, and Solidification Enthalpies of Al-Ce-Si Alloys // Metall. Mater. Trans. A. 2004. № 35. Pp. 33–49.
10. 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.
11. Шевченко А. А. Химическое сопротивление неметаллических материалов и защита от коррозии. М. : Колос, 2006. 248 с.
12. 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.
13. 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.
14. Ганиев И. Н., Саидова Ф. Р., Худойбердизода С. У., Савдуллоева С. С., Джайлоев Д. 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. № 65 (91). С. 37–41.
15. Ганиев И. Н., Саидова Ф. Р., Худойбердизода С. У., Джайлоев Д. 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.
16. Киреев С. Ю., Синенкова С. Р., Киреева С. Н., Наумов Л. В., Козлов Г. В., Бальбердин 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., Акбаров Ш. С., Худойбердизода С. У., Киреев С. Ю., Саидова М. М. Коррозионная стойкость алюминиевого сплава AlMg5.5Li2.1Zr0.15 типа дюралюмин, легированного индия, в растворе хлорида натрия // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2025. № 5 (171). С. 64–73.
18. 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.
19. 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.
20. Ganiev I. N., Jumaeva M. B., Khojanazarov Kh. M., Odiazoda 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 Таджикистана, e-mail: salima10886@mail.ru

Джайлоев Джамшед Хусейнович – к.т.н., ведущий научный сотрудник, 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, Пензенского государственного университета, 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

ANODIC BEHAVIOR OF ALUMINUM ALLOY AlMg5.5Li2.1Zr0.15 OF THE DURALUMIN TYPE, DOPED WITH CERIUM IN THE NaCl ELECTROLYTE ENVIRONMENT

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



Abstract.

The widespread use of duralumin in aviation, transportation and other industries is due to its high strength characteristics, low density and good manufacturability during casting and pressure treatment. This alloy belongs

Article info

Received:

05 November 2025

Accepted for publication:

15 May 2026

Accepted:

11 June 2026

Published:

29 June 2026

Keywords: aluminum alloy AlMg5.5Li2.1Zr0.15 of the duralumin type, potentiostatic method, cerium, NaCl electrolyte, corrosion rate, free corrosion potential, pitting potential

to the class of structural materials based on aluminum, reinforced with additives of copper, manganese, magnesium and lithium. Its operational properties are largely determined by the modes of heat treatment and the composition of alloying elements. One of the key factors limiting the durability of duralumin in aggressive environments is the tendency to local corrosion, in particular to pitting, which in freshwater is assessed primarily by the depth of the lesion.

Duralumin alloy is widely used in the aircraft industry, in the manufacture of high-speed trains (for example, Shinkansen trains) and in many other branches of engineering, as it is significantly more durable than pure aluminum. Along with its high performance properties, the diverse use of duralumin is due to its high technological efficiency, which creates the prerequisites for obtaining products using all known methods of casting and plastic processing. Duralumin belongs to the category of structural alloys, which are characterized by increased strength. They are based on aluminum. Copper, manganese, and magnesium are used as additives in different percentages. The properties of duralumin depend on the heat treatment and the amount of alloying elements added.

The paper presents the results of a study of the effect of cerium on the anodic behavior of aluminum alloy AlMg5.5Li2.1Zr0.15 type duralumin in the medium of electrolyte NaCl. The study of the corrosion-electrochemical behavior of alloys was carried out by the potentiostatic method in a potentiodynamic mode with a potential sweep rate of 2 mV·s⁻¹. It was shown that cerium additives reduce the rate of anodic corrosion of the initial alloy AlMg5.5Li2.1Zr0.15 by 20-30%. It was found that an increase in the concentration of chloride ion contributes to an increase in the rate of anodic corrosion, regardless of the cerium content in the alloy AlMg5.5Li2.1Zr0.15 of the duralumin type.

For citation: Khudoyberdizoda S.U., Ganiev I.N., Savdulloeva S.S., Dzayloev J.H., Saidzoda M.M., Kireev S.Yu., Norova M.T. Anodic behavior of aluminum alloy AlMg5.5Li2.1Zr0.15 of the duralumin type, doped with cerium in the NaCl electrolyte environment. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2026; 2(174):67-76. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2026-2-67-76, EDN: TYYCZA

REFERENCES

1. Beletskiy V.M., Krivov G.A. Alyuminiyeviy splavi. Sostav, svoystva, tekhnologiya, primeneniye. Spravochnik. Pod obsh. red. acad. Fridlyandera I.N. Kiev: KOMINTEKH; 2005. 365 p.
2. Rindina N.V. Svetniye i dragotseniye metalli i ikh splavi. M.: Visshaya shkola; 2008. 193 p.
3. Kishkina S.I. Soprotivleniye razrusheniya alyuminiyevikh splavov. M: Metallurgiya; 1981. 280 p.
4. Gerasimenko A.A., Aleksandrov Ya.I., Andreev I.N. [et al.] Zashita ot korrozii, stareniya i biopovrezhdeniy mashin, oborudovaniya i sooruzheniy: Spravochnik. M.: Mashinostroyeniye; 1987. 784 p.
5. Kuznetsov Yu.I., Rozenfeld I.L., Filimonova G.V., Linichuk T.V. Issledovaniye vliyaniya intibiruyushikh anionov na pittingoobrazovaniye splava D16 v rastvorakh, khloridov. *Zashita metallov*. 1978; 14(6):653–661.
6. Rozenfeld I.L., Kuznetsov Yu.I., Kerbeleva I.Ya. Zashita alyuminiyevogo splava D16 pri povishennikh temperaturakh v mineralizovannoy vode. V sb.: Issledovaniya po elektrokhemii i korrozii metallov. Tula: TLI; 2006. 47 p.
7. Shikun X., Rongxi Y., Zhi G., Xiang X., Chagen H., and Xiuyan G. Effects of Rare Earth Ce on Casting Properties of Al-4.5Cu Alloy, *Adv. Mater. Res.* 2010; 136:1–4.
8. Chaubey A.K., Mohapatra S., Jayasankar K., Pradhan S.K., Satpati B., Sahay S.S., Mishra B.K. and Mukherjee P.S. Effect of cerium addition on microstructure and mechanical properties of Al-Zn-Mg-Cu alloy. *Transactions of The Indian Institute of Metals*. 2009; 62(6):539–543.
9. Gröbner J., Mirkovic D., Schmid-Fetzer R. Thermodynamic Aspects of the Constitution, Grain Refining, and Solidification Enthalpies of Al-Ce-Si Alloys. *Metall. Mater. Trans. A*. 2004; 35:33–49.
10. Tarasenko L.V., Kolobnyov N.I., Khokhlatova L.B. Fazoviy sostav i mekhanicheskiye svoystva splavov sistemi Al-Mg-Li-Me. *Memalovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov*. 2008; 2:40–43.
11. Shevchenko A.A. Khimicheskoye soprotivleniye nemetallicheskih materialov i zashita ot korrozii. M.: Kolos; 2006. 248 p.
12. Khudoiberdizoda S.U., Ganiev I.N., Dzhayloev J.H., Kireev S.Yu., Yanguzarova A.Z., Kirilina Yu.N., Mulloyeva M.N. Korroziynaya stoykost svinsa, legirovannogo medyu, v rastvore khlorida natriya. *Praktika protivokorroziynoy zashiti*. 2025; 30(2):56–63.
13. Ganiev I.N., Saidov M.M., Fayzullov U.N., Khudoyberdizoda S.U. Potentsiostaticheskoye issledovaniye alyuminiyevogo splava AM4.5Mg1 tipa duralyumin s lantanom v srede vodnogo rastvora NaCl. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2024; 1(161):23–33.
14. Ganiev I.N., Saidova F.R., Khudoiberdizoda S.U., Savdulloeva S.S., Dzhayloev J.H., Abulkhaev V.D. Anodic behavior of aluminum alloy AlMg5.5Li2.1Zr0.15 alloyed with calcium in NaCl electrolyte. *Proceedings of the St. Petersburg*

State Technological Institute (Technical University). 2023; 2:37–41.

15. 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.

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., Akbarov Sh.S., Khudoyberdizoda S.U., Kireev S.Yu., Saidzoda M.M. Korroziynaya stoykost alyuminiyevogo splava AlMg5.5Li2.1Zr0.15 tipa dyuralyumin, legirovannogo indiya, v rastvore khlorida natriya. *Vestnik Kuzbaskogo gosudarsvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2025; 5(171):64–73.

18. 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 protivokorroziynoy zashiti*. 2024; 29(3):41–49.

19. 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; 98(3):764–771.

20. 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; 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. Khudoyberdizoda – 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: huseinzod85@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. Khudoyberdizoda – 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.

