

УДК 669.017:620.197

<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-6-13-21>

Научная статья

Research article



Влияние лития на анодное поведение алюминиевого проводникового сплава AlTi0.1 в среде электролита NaCl

И.Н. Ганиев¹, Г.М. Рахматуллоева², Ф.Ш. Зокиров¹, Б.Б. Эшов²¹Таджикский технический университет им. М.С. Осими

734043, Республика Таджикистан, г. Душанбе, пр-т Академиков Раджабовых, 10

²Центр по исследованию инновационных технологий Национальной академии наук Таджикистана

734063, Республика Таджикистан, г. Душанбе, пр-т Айни, 299/3

✉ Изатулло Наврузович Ганиев (ganievizatullo48@gmail.com)

Аннотация: Среди всех известных металлов алюминий по электропроводности занимает 4-е место после серебра, меди и золота. Электропроводность отожженного алюминия составляет приблизительно 62 % IACS от электропроводности отожженной стандартной меди, которая при $t = 20$ °C принимается за 100 % IACS. Однако благодаря малому удельному весу алюминий обладает проводимостью на единицу массы в 2 раза большей, чем медь, что дает нам представление об экономической выгоде применения его в качестве материала для проводников. При равной проводимости (одна и та же длина) алюминиевый проводник имеет площадь поперечного сечения на 60 % больше, чем медный, а его масса составляет только 48 % от массы меди. В большинстве случаев в электротехнике использование алюминия в качестве проводника затруднено, а часто и просто невозможно из-за его низкой механической прочности. Повышение этого значимого показателя возможно за счет введения легирующих добавок. В таком случае механическая прочность возрастает, вызывая, однако, заметное снижение электропроводности. В работе исследовано влияние добавки лития на анодное поведение алюминиевого проводникового сплава марки А5, модифицированного 0,1 мас.% Ti (сплава AlTi0.1), в среде электролита NaCl. Эксперименты проведены потенциостатическим методом в потенциодинамическом режиме при скорости развертки потенциала 2 мВ/с. Показано, что добавка лития в сплав AlTi0.1 способствует смещению потенциалов свободной коррозии, питтингообразования и репассивации в положительную область значений, а скорость коррозии при введении 0,01–0,50 мас.% Li снижается на 10–20 %. В зависимости от концентрации хлорид-иона в электролите NaCl отмечен рост скорости коррозии сплавов и смещение электрохимических потенциалов в область отрицательных значений.

Ключевые слова: алюминиевый сплав AlTi0.1, литий, потенциостатический метод, стационарный потенциал, потенциал коррозии, скорость коррозии, электролит NaCl.

Для цитирования: Ганиев И.Н., Рахматуллоева Г.М., Зокиров Ф.Ш., Эшов Б.Б. Влияние лития на анодное поведение алюминиевого проводникового сплава AlTi0.1 в среде электролита NaCl. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2023;29(6):13–21. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-6-13-21>

Effect of lithium on the anodic behavior of AlTi0.1 aluminum conducting alloy in NaCl electrolyte environment

I.N. Ganiev¹, G.M. Rakhmatulloeva², F.Sh. Zokirov¹, B.B. Eshov²¹Tajik Technical University named after M.S. Osimi

10 Academician Rajabov Prosp., Dushanbe 734043, Republic of Tajikistan

²Center for Research of Innovative Technologies
of the National Academy of Sciences of Tajikistan

299/3 Aini Prosp., Dushanbe 734063, Republic of Tajikistan

✉ Izatullo N. Ganiev (ganievizatullo48@gmail.com)

Abstract: Aluminum ranks as the fourth most conductive metal, trailing behind silver, copper, and gold in electrical conductivity. Annealed aluminum demonstrates an approximate 62 % conductivity of the International IACS compared to annealed standard copper, which registers 100 % IACS at $t = 20$ °C. Because to its low specific gravity, aluminum exhibits twice the conductivity per unit mass compared to copper,

showcasing its potential economic advantage as a material for conducting electricity. For equal conductivity (in terms of length), an aluminum conductor exhibits a cross-sectional area 60 % larger than that of copper, while weighing only 48 % of copper's mass. However, the widespread use of aluminum as a conductor in electrical engineering is often challenging and sometimes unfeasible due to its inherent low mechanical strength. Enhancing this crucial property is achievable through the addition of dopants. However, this approach tends to elevate mechanical strength at the cost of noticeable reductions in electrical conductivity. This study investigates the impact of lithium addition on the anodic behavior of an A5 aluminum conductor alloy, specifically modified with 0.1 wt.% Ti (AlTi0.1 alloy), within a NaCl electrolyte environment. The experiments were conducted utilizing the potentiostatic method in potentiodynamic mode at a potential sweep rate of 2 mV/s. Results indicate that the introduction of lithium to the AlTi0.1 alloy leads to a shift in the potentials of free corrosion, pitting, and repassivation towards positive values. Additionally, the corrosion rate decreases by 10–20 % with the incorporation of 0.01–0.50 wt.% Li. Moreover, varying concentrations of chloride ions in the NaCl electrolyte prompt fluctuations in the corrosion rate of the alloys and a shift in electrochemical potentials towards the negative range.

Key words: AlTi0.1 aluminum alloy, lithium, potentiostatic method, stationary potential, corrosion potential, corrosion rate, NaCl electrolyte.

For citation: Ganiev I.N., Rakhmatulloeva G.M., Zokirov F.Sh., Eshov B.B. Effect of lithium on the anodic behavior of AlTi0.1 aluminum conducting alloy in NaCl electrolyte environment. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2023;29(6):13–21. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-6-13-21>

Введение

В большинстве случаев в электротехнике использование алюминия в качестве проводника затруднено, а часто и просто невозможно из-за его низкой механической прочности. Упрочненный холодной деформацией проводниковый алюминий теряет свою прочность при температурах около 100 °С. Повышение его механической прочности возможно за счет введения легирующих добавок, т.е. создания сплавов [1–3], однако в таком случае заметно снижается электропроводность [4–7].

Влияние различных легирующих элементов на электропроводность и прочность алюминия показало, что наибольший рост твердости отмечается при введении малорастворимых легирующих элементов типа Fe, Zr, Mn, Cr, Ti, Ca и Mg. Все они существенно отличаются по атомным диаметрам от алюминия. Так как электропроводность является основным параметром проводникового материала, то легирующие элементы следует выбирать с учетом их влияния на изменение этого показателя [8–11].

В настоящее время существуют несколько теорий модифицирования, однако нет единого мнения в решении этой проблемы применительно к алюминиевым сплавам. Это обусловлено, во-первых, сложностью процесса модифицирования и его зависимостью от условий плавки и литья и, во-вторых, наличием неконтролируемых примесей и компонентов, которые могут влиять на измельчение исходного зерна сплава. Вводимая в качестве модификатора добавка, в нашем случае титана, должна удовлетворять следующим требованиям:

— обладать достаточной устойчивостью в расплаве без изменения химического состава;

— температура плавления добавки должна быть выше, чем у алюминия;

— необходимы структурное и размерное соответствие кристаллических решеток модификатора и алюминия [12; 13].

Роль модификаторов сводится к уменьшению поверхностного натяжения на гранях кристалла, что способствует увеличению скорости зарождения центров кристаллизации. Замедление роста кристаллов приводит к увеличению числа центров кристаллизации и измельчению структуры. Однако четкого разделения на модификаторы 1-го и 2-го рода и легирующие элементы нет, так как нет веществ, растворимых только в жидком и абсолютно не растворимых в твердом состояниях [14; 15].

Особенности коррозионного поведения и электрохимической обработки алюминиевых сплавов рассмотрены в работах [16–21].

Цель настоящей работы заключалась в исследовании влияния добавки лития на коррозионно-электрохимические свойства алюминия марки А5, модифицированного 0,1 мас.% Ti (сплава AlTi0.1).

Методики исследования коррозионно-электрохимических свойств сплавов

Для приготовления образцов сплавов были использованы алюминий марки А5 (ГОСТ 110669-01), титан ТГ-90 (ГОСТ 19807-91) и металлический литий ЛЭ-1 (ГОСТ 8774-75). Из них получали сплавы в печах типа СШОЛ, из которых в графитовую изложницу отливали стержни диаметром 8 мм и длиной 140 мм для электрохимических исследований. Рабочей поверхностью служил торец электрода.

Нерабочую часть образцов изолировали смолой (смесь 50 % канифоли и 50 % парафина). Перед погружением образца в рабочий раствор его торцевую часть зачищали наждачной бумагой, полировали, обезжиривали, тщательно промывали спиртом и затем погружали в раствор электролита NaCl. Температуру раствора в ячейке поддерживали постоянной на уровне 20 °С с помощью термостата МЛШ-8.

Электрохимические испытания образцов проводили потенциостатическим методом в потенциодинамическом режиме на импульсном потенциостате ПИ-50-1.1 со скоростью развертки потенциала 2 мВ/с в среде электролита NaCl. Электродом сравнения служил хлорид-серебряный, а вспомогательным — платиновый. Исследования электрохимических свойств тройных сплавов осуществляли по методике, описанной в работах [22–26].

В качестве примера на рис. 1 представлена полная поляризационная диаграмма для исходного

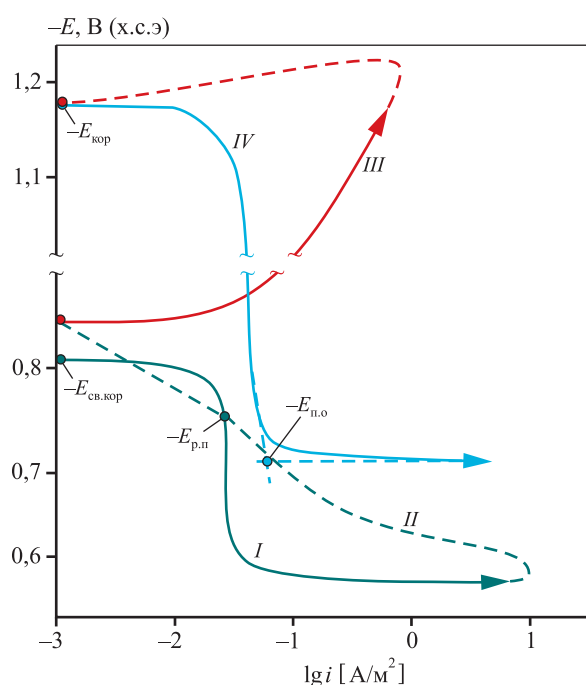


Рис. 1. Полная поляризационная кривая (при скорости развертки потенциала 2 мВ/с) алюминиевого проводникового сплава AlTi0.1 в среде электролита — 3,0 %-ного NaCl

$E_{п.о}$ — потенциал питтингообразования;
 $E_{р.п}$ — потенциал репассивации, $E_{кор}$ — потенциал коррозии

Fig. 1. Full polarization curve (at a potential sweep rate of 2 mV/s) of AlTi0.1 aluminum conducting alloy in a 3.0 % NaCl electrolyte environment

$E_{п.о}$ — potential of pitting formation; $E_{р.п}$ — repassivation potential;
 $E_{кор}$ — corrosion potential

алюминиевого сплава AlTi0.1 в среде электролита — 3 %-ного NaCl. Образцы потенциодинамически поляризовали в положительном направлении от потенциала, установившегося при погружении, до резкого возрастания тока в результате питтингообразования (рис. 1, кр. I). Затем образцы поляризовали в обратном направлении (рис. 1, кр. II) и по пересечению кривых I и II или по изгибу на кривой II определяли величину потенциала репассивации ($E_{р.п}$). Далее переходили в катодную область до значения потенциала $-1,2$ В для удаления оксидных пленок с поверхности электрода (рис. 1, кр. III) путем подщелачивания около электродной поверхности. Наконец образцы поляризовали вновь в положительном направлении (рис. 1, кр. IV) и по анодным кривым определяли основные электрохимические параметры процесса коррозии сплавов.

Расчет тока коррозии ($i_{кор}$) как основной электрохимической характеристики процесса коррозии проводили по катодной кривой с учетом тафельской наклонной $b_k = 0,12$ В и того факта, что в нейтральных средах процесс питтинговой коррозии алюминия и его сплавов контролируется катодной реакцией ионизации кислорода. Скорость коррозии, в свою очередь, является функцией тока коррозии:

$$K = i_{кор}k,$$

где $k = 0,335$ г/(А·ч) — электрохимический эквивалент алюминия.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Результаты коррозионно-электрохимических исследований алюминиевого сплава AlTi0.1 с добавкой лития в среде электролита NaCl показывают, что введение 0,01–0,5 % Li способствует смещению потенциала свободной коррозии ($E_{св.кор}$) в положительную область значений (рис. 2). При этом чем больше количество модифицирующего компонента (лития), тем положительнее величина $E_{св.кор}$. Последняя при переходе от 0,03 %-ного NaCl к 3,0 %-ному становится более отрицательной независимо от количества модифицирующей добавки (Li) в сплаве AlTi0.1.

В таблице обобщены коррозионно-электрохимические характеристики исследуемого сплава AlTi0.1 в среде электролита NaCl различной концентрации. Как видно, с ростом содержания лития в исходном образце AlTi0.1 потенциалы коррозии, питтингообразования и репассивации смещают-

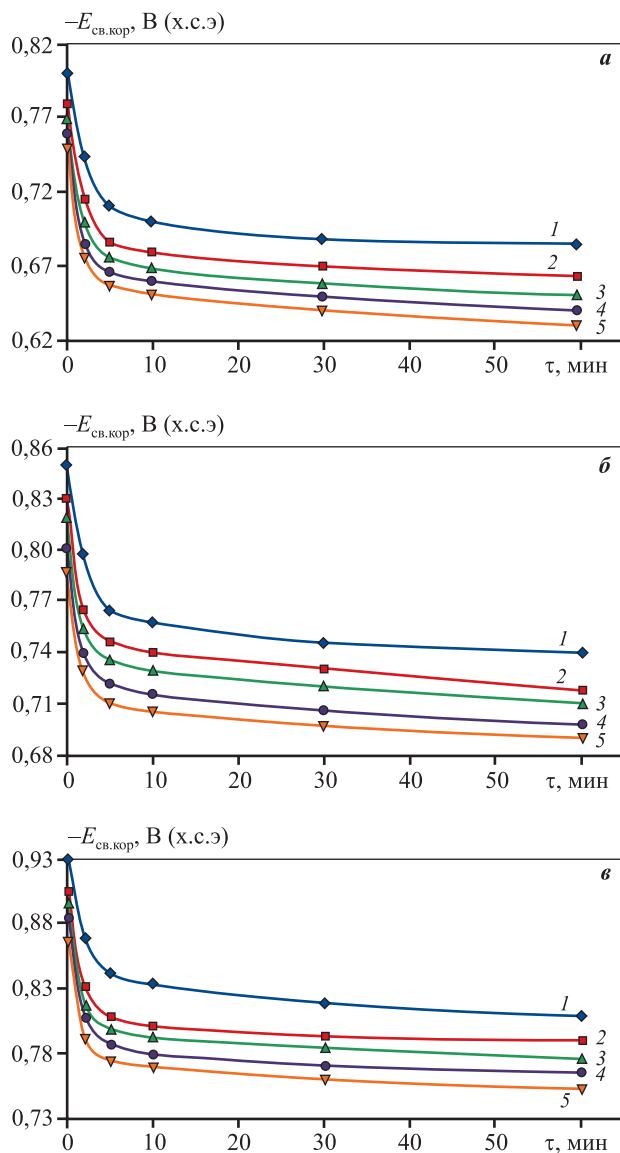


Рис. 2. Временная зависимость потенциала свободной коррозии исходного алюминиевого проводникового сплава AlTi0.1 (1) и модифицированных литием образцов (2–5) в среде электролита NaCl, мас. %: 0,03 (а), 0,3 (б) и 3,0 (в). Содержание Li, мас. %: 0 (1), 0,01 (2), 0,05 (3), 0,10 (4) и 0,50 (5)

Fig. 2. Potential of free corrosion plotted against time for the initial AlTi0.1 aluminum conducting alloy (1) and lithium-modified alloys (2–5) in NaCl electrolyte environment, wt. %: 0.03 (a), 0.3 (б) and 3.0 (в). Li, wt. %: 0 (1), 0.01 (2), 0.05 (3), 0.10 (4), 0.50 (5)

ся в положительную область значений вследствие формирования устойчивой оксидной пленки на поверхности электрода в среде NaCl.

Скорость коррозии (K) сплавов, содержащих 0,01–0,5 % Li, на 10–20 % меньше, чем у исходного образца AlTi0.1.

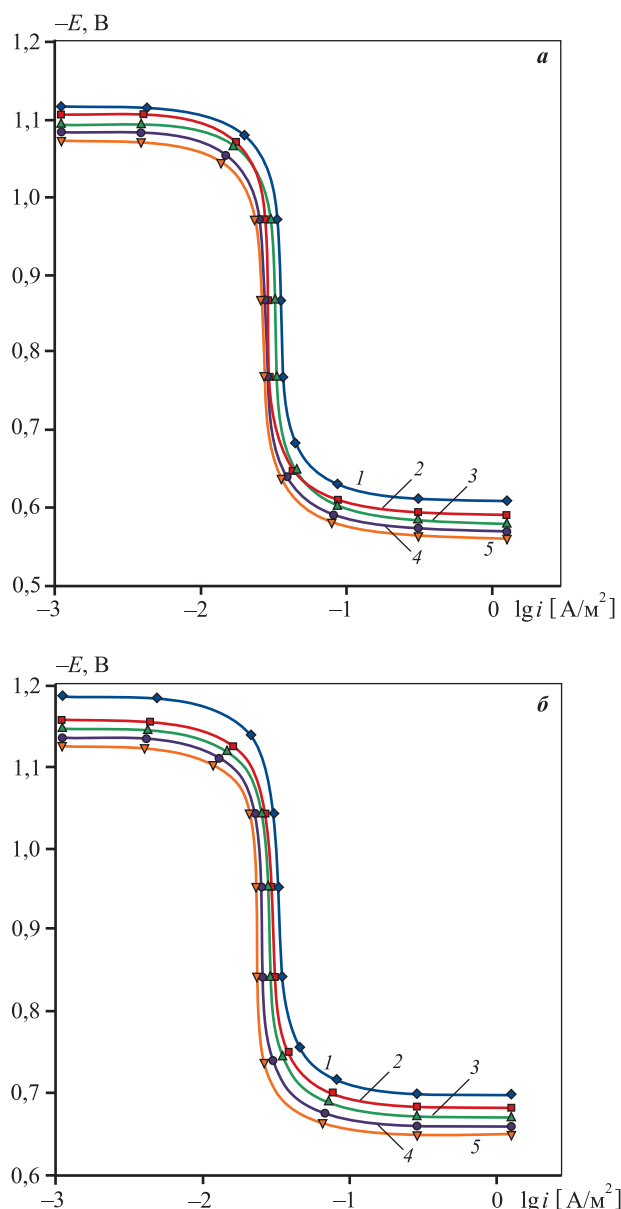


Рис. 3. Анодные ветви потенциодинамических кривых (скорость развертки потенциала 2 мВ/с) исходного алюминиевого проводникового сплава AlTi0.1 (1) и модифицированных образцов (2–5) в среде электролита NaCl, мас. %: 0,03 (а) и 3,0 (б). Содержание Li, мас. %: 0 (1), 0,01 (2), 0,05 (3), 0,10 (4) и 0,50 (5)

Fig. 3. Anode branches of potentiodynamic curves (potential sweep rate 2 mV/s) of the initial AlTi0.1 aluminum conducting alloy (1) and lithium-modified variants (2–5) in NaCl electrolyte environment 0.03 % (a) and 3.0 % (б). Li, wt. %: 0 (1), 0.01 (2), 0.05 (3), 0.10 (4) and 0.50 (5)

Таким образом, модифицирование алюминиевого проводникового сплава AlTi0.1 литием способствует снижению скорости анодной коррозии, о чем свидетельствует смещение в положительную область анодных ветвей потенциоди-

Коррозионно-электрохимические характеристики алюминиевого проводникового сплава AlTi0.1, модифицированного литием, в среде электролита NaCl

Corrosion and electrochemical characteristics of AlTi0.1 aluminum conducting alloy with varying lithium modifications in NaCl electrolyte environment

NaCl, мас.%	Li, мас.%	Электрохимические потенциалы, В (х.с.э)				Параметры коррозии	
		$-E_{\text{св.кор}}$	$-E_{\text{кор}}$	$-E_{\text{п.о}}$	$-E_{\text{р.п}}$	$i_{\text{кор}}$, А/м ²	$K \cdot 10^3$, г/(м ² ·ч)
0,03	0,0	0,685	1,120	0,610	0,660	0,048	16,0
	0,01	0,663	1,100	0,591	0,640	0,045	15,0
	0,05	0,650	1,090	0,582	0,630	0,043	14,4
	0,1	0,640	1,080	0,570	0,620	0,041	13,7
	0,5	0,630	1,071	0,560	0,610	0,039	13,0
0,30	0,0	0,740	1,150	0,650	0,690	0,068	22,7
	0,01	0,718	1,132	0,630	0,669	0,065	21,7
	0,05	0,710	1,125	0,619	0,660	0,062	21,1
	0,1	0,698	1,112	0,610	0,650	0,061	20,4
	0,5	0,690	1,100	0,600	0,641	0,059	19,7
3,00	0,0	0,809	1,180	0,700	0,750	0,086	28,8
	0,01	0,790	1,165	0,682	0,733	0,083	27,8
	0,05	0,776	1,154	0,670	0,725	0,081	27,1
	0,1	0,765	1,143	0,661	0,716	0,079	26,4
	0,5	0,752	1,130	0,650	0,705	0,077	25,7

намических кривых (рис. 3). Видно, что анодные кривые, относящиеся к модифицированным сплавам, располагаются левее кривой исходного образца AlTi0.1, т.е. скорость анодной коррозии у них несколько меньше во всех исследованных средах (см. рис. 3).

Зависимости скорости коррозии сплава AlTi0.1 от содержания в нем лития и концентрации электролита NaCl представлены на рис. 4. Выявлено, что добавки лития в сплав AlTi0.1 уменьшают скорость его коррозии при всех исследованных концентрациях электролита NaCl.

На рис. 5 представлена зависимость плотности тока коррозии алюминиевого проводникового сплава AlTi0.1 от количества добавки в нем лития при различных концентрациях электролита NaCl. Видно, что по мере увеличения содержания модификатора этот показатель коррозии снижается. Концентрацию лития в сплаве AlTi0.1 в пределах 0,05–0,50 мас.% можно считать оптимальной, так как в этом случае сплавы характеризуются минимальной скоростью коррозии. С увеличением содержания хлорид-иона

наблюдается повышение скорости коррозии как исходного алюминиевого сплава, так и модифицированного литием.

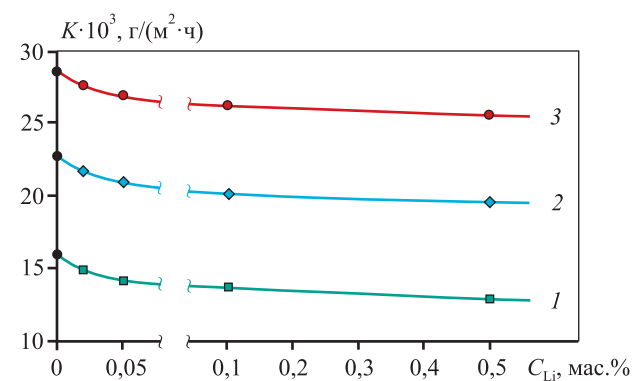


Рис. 4. Зависимость скорости коррозии алюминиевого проводникового сплава AlTi0.1 от содержания в нем лития и концентрации электролита NaCl, мас.%. 0,03 (1), 0,3 (2) и 3,0 (3)

Fig. 4. Corrosion rate variations of the AlTi0.1 aluminum conducting alloy plotted against lithium content in NaCl electrolyte environment, wt.%. 0.03 (1), 0.3 (2) and 3.0 (3)

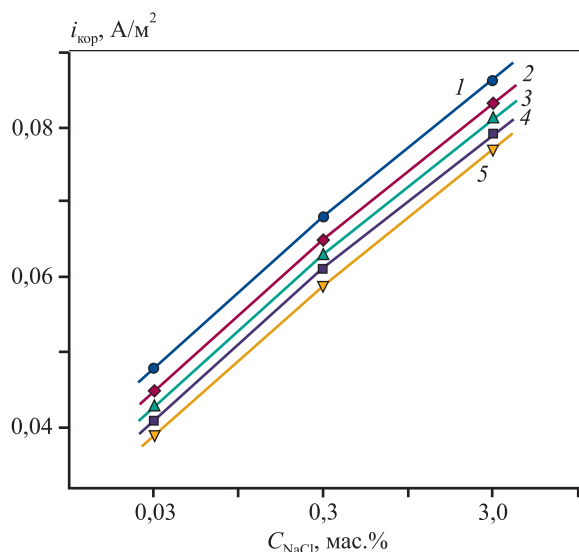


Рис. 5. Зависимость плотности тока коррозии исходного алюминиевого проводникового сплава AlTi0.1 (1) и модифицированных образцов с литием (2–5) от концентрации электролита NaCl
Содержание Li, мас. %: 0 (1), 0,01 (2), 0,05 (3), 0,10 (4) и 0,50 (5)

Fig. 5. Corrosion current density comparison between the initial AlTi0.1 aluminum conducting alloy (1) and lithium-modified alloys (2–5) in relation to the concentration of NaCl electrolyte

Li, wt. %: 0 (1), 0.01 (2), 0.05 (3), 0.10 (4), 0.50 (5)

Заключение

Сплавы алюминия относятся к материалам с высокой химической активностью и легко вступают в соединения с кислородом. В результате такого процесса на их поверхности мгновенно образуются тонкие оксидные пленки, толщина которых в естественных условиях достигает 0,01–0,02 мкм и может быть увеличена до 5 или 50 мкм путем химического или анодного оксидирования [27; 28].

Коррозионная стойкость алюминия и его сплавов в различных агрессивных средах во многом зависит от стойкости оксидной пленки, а также от химического состава сплава и вида термической обработки поверхности детали. Известно, что на этот показатель также отрицательно влияют добавки железа, никеля, олова, свинца и других примесей, образующих различные фазы [28]. Коррозионная стойкость таких материалов определяется не только химическим составом, но и характером кристаллизации избыточных фаз, определяющих их структуру, т.е. формой их выделения. Как известно, модификацией (измельчением) двойных и тройных эвтектик в структуре сплава можно зна-

чительно изменить как механические свойства, так и коррозионную стойкость.

Повышение характеристик алюминиевых сплавов неразрывно связано с разработкой новых материалов и использованием прогрессивных технологических процессов плавки и литья, обеспечивающих повышение технико-экономических показателей производства и применение изделий из них. Качество изделий зависит также от химического состава и структуры литого металла [27; 28].

Положительное действие добавки лития на анодные свойства алюминиевого проводникового сплава AlTi0.1 не может объясняться только улучшением электрохимических показателей анодного процесса или уплотнением защитного фазового слоя оксидов малорастворимыми продуктами окисления. Коррозионная стойкость алюминия зависит также от изменения структуры при модифицировании его титаном и литием, т.е. от величины кристаллов фаз в структуре сплавов. Как известно, модификаторами структуры сплава могут служить металлы, имеющие малую межатомную связь и, следовательно, низкую температуру плавления и небольшие прочность и твердость. К ним относятся и щелочные металлы.

Таким образом, установлено положительное влияние добавки лития на анодные характеристики и скорость коррозии алюминиевого проводникового сплава AlTi0.1 в среде электролита NaCl. Выявленные закономерности могут использоваться при разработке состава новых проводниковых сплавов на основе алюминия для нужд электротехники и кабельной техники.

Список литературы/References

1. Снитовский Ю.П. Влияние состава легирующих элементов на физико-механические свойства алюминия. *Вестник Югорского государственного университета*. 2022;4(67):68–76. <https://doi.org/10.18822/byusu20220468-76>
Snitovsky Yu.P. The influence of the composition of alloying elements on the physical and mechanical properties of aluminum. *Vestnik Yugorskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2022;4(67):68–76. (In Russ.). <https://doi.org/10.18822/byusu20220468-76>
2. Короткова Н.О., Белов Н.А., Авксентьева Н.Н., Аксенов А.А. Влияние добавки кальция на фазовый состав и физико-механические свойства проводникового сплава Al–0,5% Fe–0,2% Si–0,2% Zr–0,1% Sc. *Физика металлов и металловедение*. 2020; 121(1): 105–112. <https://doi.org/10.31857/S001532302001009X>

- Korotkova N.O., Belov N.A., Avksentyeva N.N., Akse-
nov A.A. The influence of calcium additives on the phase
composition and physical and mechanical properties of
the conductor alloy Al—0.5% Fe—0.2% Si—0.2% Zr—
0.1%Sc. *Fizika metallov i metallovedenie*. 2020; 121(1):105—
112. (In Russ.).
<https://doi.org/10.31857/S001532302001009X>
3. Белов Н.А., Алабин А.Н., Прохоров А.Ю. Влияние
добавки циркония на прочность и электросопротив-
ление холоднокатаных алюминиевых листов. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2009;(4):42—47.
Belov N.A., Alabin A.N., Prokhorov A.Yu. The influence
of zirconium additives on the strength and electrical
resistance of cold-rolled aluminum sheets. *Izvestiya. Non-
Ferrous Metallurgy*. 2009;(4):42—47. (In Russ.).
 4. Duan Yu., Xu G.F., Zhou L., Xiao D. Achieving high
superplasticity of a traditional thermal—mechanical
processed non-superplastic Al—Zn—Mg alloy sheet
by low Sc additions. *Journal of Alloys and Compounds*.
2015;638:364—373.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.03.090>
 5. Belov N.A., Alabin A.N., Teleulova A.R. Comparative
analysis of alloying additives as applied to the production
of heat-resistant aluminum-base wire. *Metal Science and
Heat Treatment*. 2012;9:455—459.
<https://doi.org/10.1007/s11041-012-9415-5>
 6. Белый Д.И. Алюминиевые сплавы для токопрово-
дящих жил кабельных изделий. *Кабели и провода*.
2012;1:8—15.
Bely D.I. Aluminum alloys for conductive cores of cable
products. *Кабели и провода*. 2012;1:8—15. (In Russ.).
 7. Chao R.Z., Guan X.H., Guan R.G., Tie D., Lian C.,
Wang X. Effect of Zr and Sc on mechanical properties and
electrical conductivities of Al wires. *Transactions of Non-
Ferrous Metals Society of China* (Eng. Ed.). 2014;24:3164—
3169. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(14\)63456-7](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(14)63456-7)
 8. Fallah V., Langelier B., Ofori-Opoku N., Raeisia B.,
Provatas N., Esmaili S. Cluster evolution mechanisms
during aging in Al—Mg—Si alloys. *Acta Materialia*.
2016;103:290—300.
<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2015.09.027>
 9. Mavlyutov A.M., Bondarenko A.S., Murashkin M.Y.,
Boltynjuk E.V., Valiev R.Z., Orlova T.S. Effect of anneal-
ing on microhardness and electrical resistivity of nano-
structured SPD aluminium. *Journal of Alloys and Com-
pounds*. 2017;698:539—546.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.12.240>
 10. Останина Т.В., Швейкин А.И., Трусов П.В. Из-
мельчение зеренной структуры металлов и сплавов
при интенсивном пластическом деформировании:
экспериментальные данные и анализ механизмов. *Вестник Пермского национального исследовательско-
го политехнического университета. Механика*. 2020;2:
85—111. <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2020.2.08>
Ostanina T.V., Shveikin A.I., Trusov P.V. Refinement of
the grain structure of metals and alloys under intense
plastic deformation: experimental data and analysis of
mechanisms. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledo-
vatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika*.
2020;2:85—111. (In Russ.).
<https://doi.org/10.15593/perm.mech/2020.2.08>
 11. Gloria A., Montanari R., Richetta M., Varone A. Alloys
for aeronautic applications: state of the art and perspec-
tives. *Metals*. 2019;9(6):662.
<https://doi.org/10.3390/met9060662>
 12. Jarry P., Rappaz M. Recent advances in the metallurgy of
aluminium alloys. Pt. I: *Solidification and Casting. C. R.
Phys*. 2018;19:672—687.
<https://doi.org/10.1016/j.crhy.2018.09.003>
 13. Деев В.Б., Ри Э.Х., Пруссов Е.С., Ермаков М.А., Гон-
чаров А.В. Модифицирование литейных алюми-
ниевых сплавов системы Al—Mg—Si обработкой жид-
кой фазы наносекундными электромагнитными
импульсами. *Известия вузов. Цветная металлургия*.
2021;27(4):32—41.
<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2021-4-32-41>
Deev V.B., Ri E.Kh., Prusov E.S., Ermakov M.A.,
Goncharov A.V. Modification of cast aluminum alloys
of the Al—Mg—Si system by treating the liquid phase
with nanosecond electromagnetic pulses. *Izvestiya. Non-
Ferrous Metallurgy*. 2021;27(4):32—41. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2021-4-32-41>
 14. Долгополов В.Г., Дубровский В.А., Симонов М.Ю.,
Симонов Ю.Н., Юрченко А.Н., Шибанова К.А. Спо-
собы влияния на структуру и свойства алюми-
ниевых сплавов, используемых в авиакосмической от-
расли. *Вестник ПНИПУ*. 2016;18(2):50—62.
<https://doi.org/10.15593/2224-9877/2016.2.04>
Dolgoplov V.G., Dubrovsky V.A., Simonov M.Yu., Simo-
nov Yu.N., Yurchenko A.N., Shibanova K.A. Me-
thods of influencing the structure and properties of
aluminum alloys used in the aerospace industry. *Vestnik
PNIPU*. 2016;18(2):50—62. (In Russ.).
<https://doi.org/10.15593/2224-9877/2016.2.04>
 15. Дуюнова В.А., Трапезников А.В., Леонов А.А., Коре-
нева Е.А. Модифицирование литейных алюми-
ниевых сплавов (обзор). *Труды ВИАМ*. 2023;4(122):14—26.
<https://doi.org/10.18577/2307-6046-2023-0-4-14-26>
Duyunova V.A., Trapeznikov A.V., Leonov A.A., Kore-
neva E.A. Modification of cast aluminum alloys (review).
Trudy VIAM. 2023;4(122):14—26. (In Russ.).
<https://doi.org/10.18577/2307-6046-2023-0-4-14-26>
 16. Григорьева И.О., Дресвянников А.Ф., Храмова А.В.,
Михалишин И.О. Влияние анионов на электро-

- химическое поведение алюминия в растворах солей. *Вестник технологического университета*. 2018;21(7):46–50.
- Grigorieva I.O., Dresvyannikov A.F., Khramova A.V., Mikhailishin I.O. Influence of anions on the electrochemical behavior of aluminum in salt solutions. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*. 2018;21(7):46–50. (In Russ.).
17. Григорьева И.О., Дресвянников А.Ф., Хайруллина Л.Р., Печенина Ю.С. Особенности анодного растворения комбинированного электрода железо-титан в водных растворах, содержащих галогенид-ионы. *Вестник технологического университета*. 2017;20(13):43–47.
 - Grigorieva I.O., Dresvyannikov A.F., Khairullina L.R., Pechenina Yu.S. Features of anodic dissolution of a combined iron-titanium electrode in aqueous solutions containing halide ions. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*. 2017;20(13):43–47. (In Russ.).
 18. Григорьева И.О., Межевич Ж.В. Технология электрохимической и химической обработки металлов. Казань: КНИТУ, 2019. 144 с.
 19. Dresvyannikov A.F., Grigoryeva I.O., Khayrullina L.R. Anodic behavior of a titanium-aluminum hybrid electrode: Formation of hydroxide-oxide compounds. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. 2017;53(6):1050–1058.
<https://doi.org/10.1134/S2070205117060090>
 20. Попова А. А. Методы защиты от коррозии: Курс лекций. Санкт-Петербург: Лань, 2014. 272 с.
<https://e.lanbook.com/book/211634>
 21. Андрушевич А.А., Ушеренко С.М. Коррозионная стойкость динамически нагруженного литейного сплава АК12. *Литье и металлургия*. 2017;2(87):70–75.
<https://rep.bntu.by/handle/data/31584>
 - Andrushevich A.A., Usherenko S.M. Corrosion resistance of dynamically loaded casting alloy AK12. *Lityo i metallurgiya*. 2017;2(87):70–75. (In Russ.).
<https://rep.bntu.by/handle/data/31584>
 22. Ganiev I.N., Rakhmatulloeva G.M., Zokirov F.Sh., Eshov B.B. The effect of sodium additives on the anodic behavior of AlTi0.1 aluminum conductor alloy in a medium of NaCl electrolyte. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. 2023;59(4):451–455.
<https://doi.org/10.1134/S2070205123700727>
 23. Ганиев И.Н., Файзуллоев Р.Дж., Зокиров Ф.Ш. Влияние кальция на анодное поведение алюминиевого проводникового сплава AlTi0.1 в среде электролита NaCl. *Известия СПбГТИ (ТУ)*. 2021; 58(84):33–37.
<https://doi.org/10.36807/1998-9849-2021-58-84-33-37>
 - Ganiev I.N., Faizulloev R.J., Zokirov F.Sh. The influence of calcium on the anodic behavior of aluminum conductor alloy AlTi0.1 in a NaCl electrolyte environment. *Izvestiya SPbGTI (TU)*. 2021;58(84):33–37. (In Russ.).
<https://doi.org/10.36807/1998-9849-2021-58-84-33-37>
 24. Зокиров Ф.Ш., Ганиев И.Н., Бердиев А.Э., Сангов М.М. Влияние бария на анодное поведение сплава АК12М2. *Вестник Таджикского технического университета. Серия: Инженерные исследования*. 2018;3(43):30–33.
 - Zokirov F.Sh., Ganiev I.N., Berdiev A.E., Sangov M.M. The effect of barium on the anodic behavior of the AK12M2 alloy. *Vestnik Tadjhikskogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Inzhenernye Issledovaniya*. 2018;3(43):30–33. (In Russ.).
 25. Зокиров Ф.Ш., Ганиев И.Н., Бердиев А.Э., Сангов М.М. Влияние стронция на анодное поведение сплава АК12М2. *Доклады АН Республики Таджикистан*. 2019;62(2):93–98.
 - Zokirov F.Sh., Ganiev I.N., Berdiev A.E., Sangov M.M. The effect of strontium on the anodic behavior of the AK12M2 alloy. *Doklady AN Respubliki Tadjhikistan*. 2019;62(2):93–98. (In Russ.).
 26. Ганиев И.Н., Зокиров Ф.Ш., Амиров А.Дж. Влияние лантана на анодное поведение алюминиевого проводникового сплава AlTi0.1 в среде электролита NaCl. *Вестник ПНИПУ*. 2023;3:66–78.
<https://doi.org/10.15593/2224-9400/2023.3.05>
 - Ganiev I.N., Zokirov F.Sh., Amirov A.J. The influence of lanthanum on the anodic behavior of the aluminum conductor alloy AlTi0.1 in the NaCl electrolyte environment. *Vestnik PNIPU*. 2023;3:66–78. (In Russ.).
<https://doi.org/10.15593/2224-9400/2023.3.05>
 27. Строганов Г.Б., Ротенберг В.А., Гершман Г.Б. Сплавы алюминия с кремнием. М.: Металлургия, 1977. 272 с.
 28. Постников Н.С. Коррозионно-стойкие алюминиевые сплавы. М.: Металлургия, 1976. 301 с.

Информация об авторах

Изатулло Наврузович Ганиев – д.х.н., академик Национальной академии наук (НАН) Таджикистана, профессор кафедры технологии химических производств Таджикского технического университета им. М.С. Осими.

<https://orcid.org/0000-0002-2791-6508>

E-mail: ganievizatullo48@gmail.com

Гулноза Мухриевна Рахматуллоева – ст. науч. сотрудник Центра по исследованию инновационных технологий НАН Таджикистана.

<https://orcid.org/0009-0002-2181-0347>

E-mail: Golnoz.86@mail.ru

Фуркатшош Шахриерович Зокиров – к.т.н., доцент кафедры физики Таджикского технического университета им. М.С. Осими.

<https://orcid.org/0009-0000-8174-2214>

E-mail: Zokirov090514@mail.ru

Бахтиер Бадалович Эшов – д.т.н., директор Центра по исследованию инновационных технологий НАН Таджикистана.

<https://orcid.org/0009-0003-0512-9989>

E-mail: ishov1967@mail.ru

Information about the authors

Izatullo N. Ganiev – Dr. Sci. (Chem.), Academician of the National Academy of Sciences of Tajikistan, Professor of the Department of Chemical Production Technology, Tajik Technical University n.a. M.S. Osimi.

<https://orcid.org/0000-0002-2791-6508>

E-mail: ganievizatullo48@gmail.com

Gulnoza M. Rakhmatulloeva – Senior Researcher, Center for Research of Innovative Technologies of the National Academy of Sciences of Tajikistan.

<https://orcid.org/0009-0002-2181-0347>

E-mail: Golnoz.86@mail.ru

Furkatshoh Sh. Zokirov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Physics, Tajik Technical University n.a. M.S. Osimi.

<https://orcid.org/0009-0000-8174-2214>

E-mail: Zokirov090514@mail.ru

Bakhtier B. Eshov – Dr. Sci. (Eng.), Director of the Center for Research of Innovative Technologies of the National Academy of Sciences of Tajikistan.

<https://orcid.org/0009-0003-0512-9989>

E-mail: Golnoz.86@mail.ru

Вклад авторов

И.Н. Ганиев – формирование основной концепции, постановка цели и задачи исследования, подготовка текста, формулировка выводов.

Г.М. Рахматуллоева – осуществление расчетов, проведение испытаний образцов, подготовка текста статьи.

Ф.Ш. Зокиров – обеспечение ресурсами, подготовка и проведение экспериментов, формирование основной концепции, постановка цели и задачи исследования, подготовка текста, формулировка выводов.

Б.Б. Эшов – научное руководство, корректировка текста, корректировка выводов.

Contribution of the authors

I.N. Ganiev – formulated the concept, objectives, and goals of the study; wrote the manuscript and contributed to formulating the conclusions.

G.M. Rakhmatulloeva – conducted calculations, wrote the manuscript, and performed sample testing.

F.Sh. Zokirov – supplied resources, organized and supervised experiments, contributed to defining the main concept, objectives, and goals of the study; wrote the manuscript and contributed to the conclusions.

B.B. Eshov – provided scientific oversight, reviewed the manuscript, and contributed to the conclusions.

Статья поступила в редакцию 11.10.2022, доработана 04.08.2023, подписана в печать 08.11.2023

The article was submitted 11.10.2022, revised 04.08.2023, accepted for publication 08.11.2023