ISSN 1999-4125 (Print) **ISSN 2949-0642 (Online)**

Научная статья
УДК 620.193.669.5
DOI: 10.26730/1999-4125-2026-4-98-106

АНОДНОЕ ПОВЕДЕНИЕ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Zn-Nb В СРЕДЕ РАСТВОРА NaCl

Изатулло Наврузович Ганиев[1], Зухуриддин Дилшодович Махсумов[2], Фирузи Сулаймони Давлатзода[2], Умарали Шералиевич Якубов[1], Шахром Шукурбоевич Окилов[1], Акрам Раджабович Рашидов[3]

[1] Институт химии им. В.И. Никитина НАН Таджикистана
[2] Дангаринский государственный университет
[3] Энергетический институт Таджикистана

[*] для корреспонденции: yakubovumarali@gmail.com

Аннотация.
Современный научно-технический прогресс способствует развитию цветной металлургии высокими темпами. В общем объеме производства цветных металлов, которые широко используются в промышленности, цинк занимает четвертое место. Благодаря специфическим свойствам цинк и его сплавы получили широкое применение в качестве конструкционных и не конструкционных изделий. Значительная часть производимого металлического цинка расходуется для покрытия ими металлических листов, изготовления полуфабрикатов и фасонных отливок. Сплавы на основе цинка в последние годы широко используются для изготовления литых протекторов, применяемых для защиты морских судов и сооружений от коррозии. Расширение областей использования цинковых изделий ставит новые задачи перед специалистами, занимающимся производством и применением новых сплавов на основе цинка. Одной из легирующих добавок цинковых сплавов является ниобий. Сообщается, что ниобий (до 0,1 мас. %) повышает твердость и ухудшает пластичность и коррозионную стойкость цинка. Содержание ниобия (Nb) в деформируемых сплавах на основе цинка обычно очень невелико и, как правило, достигает до 0,1-0,3 мас. %. В связи с противоречивыми фактами относительно влияния ниобия на коррозионную стойкость цинка нами исследовано влияние его добавок до 0.5 мас. % на коррозионно-электрохимическое поведение высокочистого цинка в среде раствора NaCl. Электрохимическое поведение сплавов системы Zn-Nb исследовано методом потенциостатической поляризации при скорости развертки потенциала 2 мВ/с в растворе NaCl. Установлено, что увеличение концентрации ниобия приводит к смещению потенциала свободной коррозии, а также потенциалов репассивации и питтингообразования в положительную область. При повышении концентрации хлорид-ионов в растворе NaCl наблюдается смещение электрохимических потенциалов сплавов системы Zn-Nb в отрицательную область. Показано, что введение ниобия снижает скорость коррозии цинка в среде NaCl на 20%.

CC BY

Информация о статье
Поступила:
20 февраля 2026 г.

Одобрена после рецензирования:
01 сентября 2026 г.

Принята к публикации:
15 сентября 2026 г.

Ключевые слова:
сплавы системы Zn-Nb, потенциостатический метод, раствор NaCl, потенциал коррозии, потенциал питтингообразования, скорость коррозии, микроструктура

Для цитирования: Ганиев И.Н., Махсумов З.Д., Давлатзода Ф.С., Якубов У.Ш., Окилов Ш.Ш., А.Р. Анодное поведение сплавов системы Zn-Nb в среде раствора NaCl // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2026. № 4 (176). С. 98-106. DOI: 10.26730/1999-4125-2026-4-98-106, EDN: DRWBST

Введение

Коррозия цинка и его сплавов играет ключевую роль в мировой промышленности, выступая основным способом защиты стальных конструкций. В отличие от железа, продукты окисления которого (ржавчина) разрушают металл, коррозия цинка носит контролируемый и защитный характер. Цинк является более активным металлом, чем железо. В гальванической паре «цинк-сталь» именно цинк выступает в роли жертвенного анода. Цинк критически важен для защиты конструкций в возобновляемой энергетике (ветрогенераторы, солнечные панели) и инфраструктуры сверхвысокого напряжения. Цинковые сплавы используются для изготовления прочных и точных корпусов электронных устройств, обеспечивая защиту и долговечность [1–4].

Около 40% цинка используется в цинковании различных изделий в качестве защиты от коррозионных воздействий. Кроме чистого цинка также от коррозии хорошо защищают поверхности сплавы цинка. Цинкованию подвергаются различные изделия – это листовая сталь, проволока, детали автомашин, приборов, трубы трубопроводов и различные виды арматуры [5].

В автомобильной промышленности цинковые сплавы широко используются для производства различных компонентов благодаря их высокой прочности, долговечности и превосходной литейной способности. Цинковые сплавы – это металлы, состоящие в основном из цинка в сочетании с другими элементами для улучшения определенных свойств. Цинковые сплавы используются для производства карбюраторов, топливных насосов и других деталей двигателей, требующих точности и прочности. Некоторые хирургические инструменты и устройства изготавливаются из цинковых сплавов, обеспечивающих необходимую прочность и точность. Цинковые сплавы используются для изготовления деталей антенн и других устройств связи, обеспечивая их долговременную работу и надежность [6, 7].

Целью данной работы является исследование анодного поведения сплавов системы Zn-Nb в среде раствора NaCl различной концентрации.

Материалы и методики исследования

Для получения сплавов системы Zn-Nb использовался металлический цинк марки Ц0-99,995 (ГОСТ 3640-94). Легирование осуществляли металлическим ниобием марки НБ-1 (99,8%, ГОСТ 26468-85, в шахтной лабораторной печи типа СШОЛ при температуре 650^{0}С. Содержание ниобия в цинке варьировалось в пределах 0.01-0.5 мас. %. Из полученных сплавов для исследования электрохимических свойств отливали цилиндрические образцы диаметром 8 мм и длиной 140 мм в графитовую изложницу (Рис. 1).

Рис. 1. Образцы из сплавов системы Zn-Nb
Fig. 1. Samples from Zn–Nb alloy system

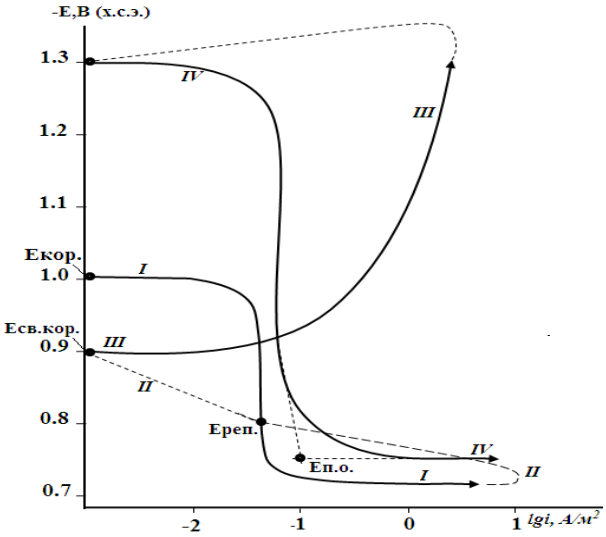


Рис. 2. Полная поляризационная (2мВ/с) кривая цинка в среде раствора 3.0%-ного NaCl
Fig. 2. Complete polarization curve of zinc (2 mV/s) in a 3.0% NaCl solution

Для изучения электрохимических свойств сплавов применяли потенциостатический метод, подробно описанный в работах [8–13]. Электрохимические испытания образцов проводились потенциостатическим методом в потенциодинамическом режиме на потенциостате ПИ-50-1.1 со скоростью развертки потенциала 2 мВ/с, в раствор NaCl. В качестве электродов использовались хлорид-

серебряный в роли электрода сравнения и платиновый в роли вспомогательного.

Поскольку подготовка рабочей поверхности образцов (электрода) значительно влияет на величину потенциала, измерения потенциала во времени проводились при двух различных методах обработки поверхности. При механической подготовке поверхность зачищали наждачной бумагой, последовательно переходя от крупнозернистой к мелкозернистой (№ 2-00), затем промывали дистиллированной водой, полировали влажной фильтровальной бумагой и сушили на воздухе.

Было установлено, что через определенное время потенциал свободной коррозии (бестоковый потенциал) стабилизируется и становится независимым от способа предварительной подготовки электрода. Исходя из этого, поверхность электрода для снятия потенциодинамических кривых готовили механическим методом. Также проводилась катодная поляризация поверхности для удаления оксидов. Ниже представлена подробная методика снятия поляризационных кривых сплавов в растворе NaCl на примере цинка металлического (Рис. 2).

При электрохимических испытаниях образцы потенциодинамически поляризовали в положительном направлении от потенциала, установившегося при погружении, до резкого возрастания тока в результате питингообразования (Рис. 2, кривая *I*). Затем образцы поляризовали в обратном направлении (Рис. 2, кривые *II* и *III*) до потенциала (-1,3 В), в результате чего происходило растворение пленки оксида. Наконец, образцы поляризовали снова в положительном направлении, получив анодную поляризационную кривую сплавов (Рис.

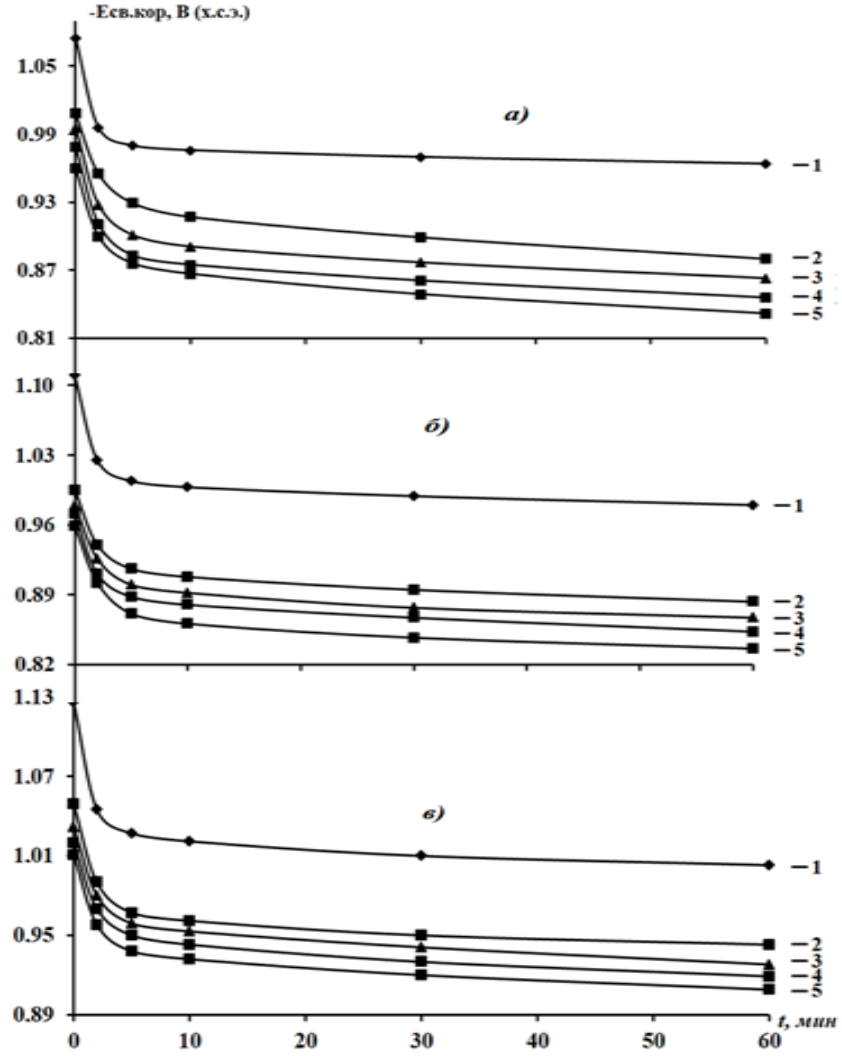


Рис. 3. Временная зависимость потенциала свободной коррозии (-$E_{св.кор.}$, В) сплавов системы Zn-Nb (1), содержащих ниобий, мас. %:0.01(2); 0.05(3); 0.1(4); 0.5(5), в среде раствора 0.03% (а), 0.3% (б) и 3.0%-ного (в) NaCl

Fig. 3. Time dependence of the open-circuit corrosion potential (−E_{corr}, V) of Zn–Nb alloy system (1), containing niobium, wt. %: 0.01 (2); 0.05 (3); 0.1 (4); 0.5 (5), in 0.03% (a), 0.3% (b), and 3.0% (c) NaCl solution

2, кривая *IV*). Все четыре потенциодинамические кривые цинка, снятые в среде 3.0%-ного раствора NaCl, приведены на Рис. 2.

По ходу прохождения полной поляризационной кривой определяли следующие электрохимические параметры:

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

$-E_{\text{р.п.}}$ – потенциал репассивации;

$-E_{\text{п.о.}}$ – потенциал питтингообразовапния;

$-E_{\text{кор.}}$ – потенциал коррозии;

$-i_{\text{кор.}}$ – ток коррозии.

Учитывая, что в нейтральных средах процесс коррозии цинка и его сплавов контролируется катодной реакцией ионизации кислорода, расчет тока коррозии проводили из катодной ветви

Таблица. Коррозионно-электрохимические характеристики сплавов системы Zn-Nb в среде раствора NaCl

Table. Corrosion-electrochemical characteristics of Zn-Nb alloy system in NaCl solution

Среда NaCl	Содержание ниобия в цинке	Электрохимические потенциалы, В (х.с.э.)				Скорость коррозии	
		$-E_{\text{св.кор.}}$	$-E_{\text{кор.}}$	$-E_{\text{п.о.}}$	$-E_{\text{р.п.}}$	$i_{\text{кор}}\cdot10^2$, А/м^2	К·10^3, г/м^2·ч
мас. %							
0.03	-	0,964	1,223	0,700	0,770	7,4	90,2
	0.01	0,880	1,133	0,632	0,691	6,4	78,0
	0.05	0,863	1,124	0,623	0,682	6,2	75,6
	0.1	0,846	1,115	0,614	0,673	6,0	73,2
	0.5	0,832	1,106	0,605	0,664	5,8	70,7
0.3	-	0,980	1,240	0,735	0,790	8,5	103,7
	0.01	0,883	1,173	0,658	0,707	7,5	91,5
	0.05	0,867	1,164	0,649	0,698	7,3	89,0
	0.1	0,853	1,154	0,639	0,689	7,1	86,6
	0.5	0,836	1,145	0,630	0,680	6,9	84,1
3.0	-	1,003	1,300	0,750	0,800	9,2	112,2
	0.01	0,943	1,215	0,699	0,748	8,1	99,8
	0.05	0,928	1,205	0,690	0,738	7,9	96,3
	0.1	0,919	1,195	0,680	0,729	7,7	93,9
	0.5	0,909	1,185	0,670	0,720	7,5	91,5

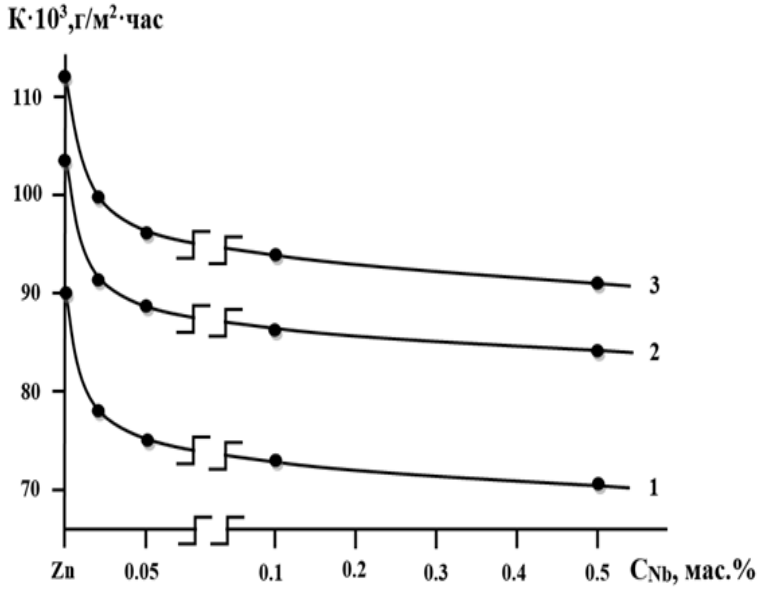


Рис. 4. Зависимость скорости коррозии сплавов системы Zn-Nb в среде раствора 0.03%(1), 0.3%(2) и 3.0%(3)-ного NaCl

Fig. 4. Dependence of the corrosion rate of Zn–Nb alloys on NaCl solution concentration: 0.03%(1), 0.3%(2) and 3.0%(3)

потенциодинамических кривых, с учетом тафеловской константы, равной $в_к$ = 0.12В. Скорость коррозии K определяли по току коррозии ($i_{кор.}$) по формуле $K = i_{кор.} \cdot k$, где $k = 1.22$ г/А · ч (электрохимический эквивалент цинка)

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Временная зависимость потенциала свободной коррозии сплавов системы Zn-Nb в среде раствора NaCl характеризуется его смещением в положительную область со временем независимо от содержания ниобия в цинке. Стабилизация потенциала свободной коррозии наблюдается спустя 60 мин, и далее достигается постоянное значение (Рис. 3).

В таблице приведены обобщенные результаты электрохимических исследований

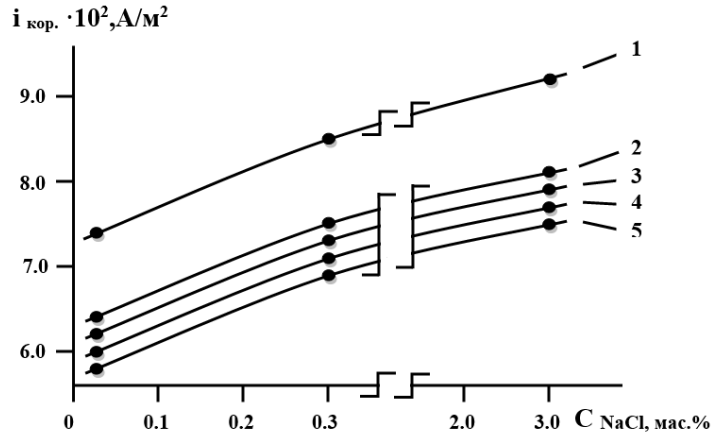


Рис. 5. Зависимость плотности тока коррозии сплавов системы Zn- Nb (1), содержащих ниобий, мас. %: 0.01(2); 0.05(3); 0.1(4); 0.5(5), от концентрации NaCl

Fig. 5. Dependence of the corrosion current density of Zn–Nb system alloys (1) containing niobium, wt. %: 0.01 (2); 0.05 (3); 0.1 (4); 0.5 (5), on the NaCl concentration

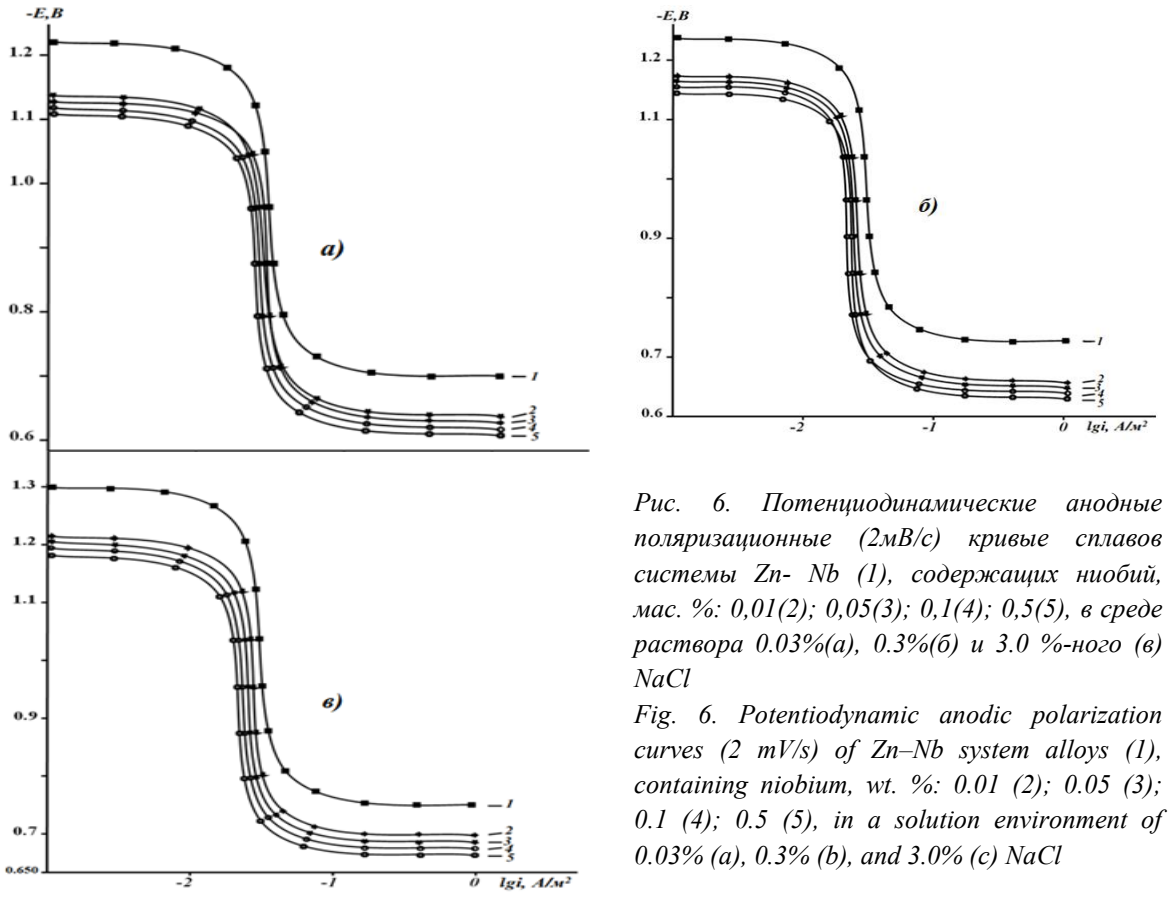
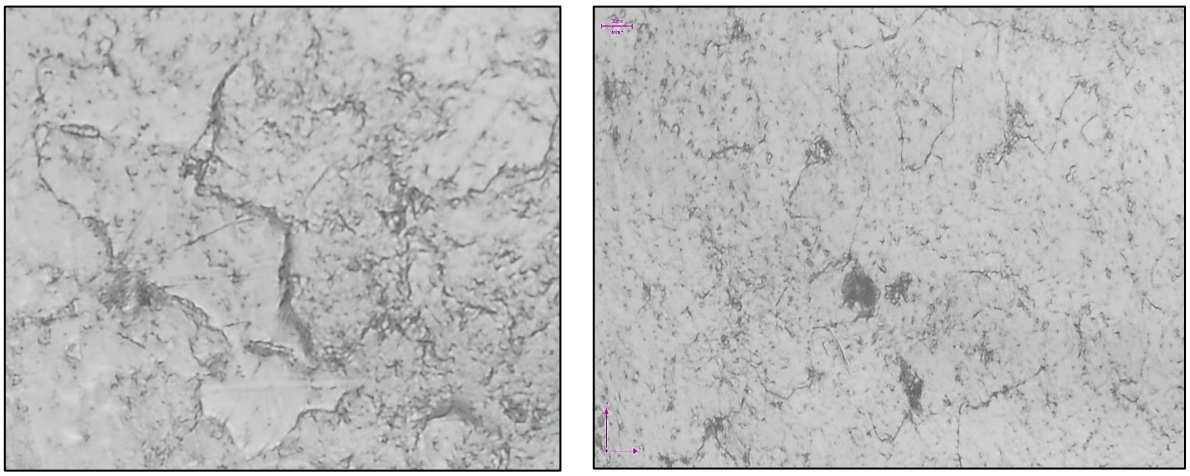


Рис. 6. Потенциодинамические анодные поляризационные (2мВ/с) кривые сплавов системы Zn- Nb (1), содержащих ниобий, мас. %: 0,01(2); 0,05(3); 0,1(4); 0,5(5), в среде раствора 0.03%(а), 0.3%(б) и 3.0 %-ного (в) NaCl

Fig. 6. Potentiodynamic anodic polarization curves (2 mV/s) of Zn–Nb system alloys (1), containing niobium, wt. %: 0.01 (2); 0.05 (3); 0.1 (4); 0.5 (5), in a solution environment of 0.03% (a), 0.3% (b), and 3.0% (c) NaCl



а) *б)*

Рис. 7. Микроструктуры (х500) сплавов системы Zn-Nb, содержащих ниобий, мас. % 0,01(а) и 0,05 мас. % (б)

Fig. 7. Microstructures (×500) of Zn-Nb system alloys containing 0.01, wt. % (a) and 0.05 wt. % (b) niobium

сплавов системы Zn-Nb в среде раствора NaCl различной концентрации. Во всех исследуемых средах с увеличением содержания ниобия в исходном цинке наблюдается смещение потенциалов коррозии, питтингообразования и репассивации в положительную область (таблица).

Таблица. Коррозионно-электрохимические характеристики сплавов системы Zn-Nb

Зависимость скорости коррозии сплавов системы Zn-Nb в растворе NaCl с концентрацией 0.03%, 0.3% и 3.0% представлена на Рис. 4. Результаты исследований показывают, что во всех рассмотренных средах добавка ниобия приводит к снижению скорости коррозии цинка. При этом увеличение концентрации NaCl (хлорид-ионов) способствует росту скорости коррозии сплавов (см. Рис. 5). Минимальные значения скорости коррозии и плотности коррозионного тока для сплавов Zn-Nb наблюдаются при содержании ниобия 0,5 мас. %.

Анодные ветви потенциостатических кривых исследуемых сплавов системы Zn-Nb представлены на Рис. 6. С увеличением концентрации ниобия потенциалы свободной коррозии ($E_{св.кор.}$) и питтингообразования ($E_{п.о.}$) смещаются в положительную область, при этом плотность коррозионного тока сплавов снижается. Указанные изменения сопровождаются смещением анодных ветвей потенциодинамических кривых сплавов системы Zn–Nb в область более положительных значений потенциалов.

Микроструктуры сплавов исследовались на микроскопе «KP-L3230-2K». В качестве примера на Рис. 7 представлены микроструктуры образцов из сплавов системы Zn-Nb. Добавка ниобия способствует измельчению твердого раствора цинка (Рис. 7).

Выводы

1. Потенциостатическим методом при скорости развертки потенциала 2 мВ/с исследовано анодное поведение сплавов цинка с ниобием в среде раствора NaCl. Показано, что добавка 0.5% ниобия снижает скорость коррозии цинка на 20%. От концентрации электролита NaCl скорость коррозии сплавов увеличивается на 8-11%.

2. Установлено, что легирование цинка ниобием смещает в область положительных значений потенциалы коррозии, питтингообразования и репассивации сплавов.

3. Улучшение коррозионной стойкости цинка на 20% в результате его легирования ниобием до 0.5 мас. % позволяет снизить толщину защитного покрытия на оцинкованной стали также на 20% при одинаковых условиях эксплуатации оцинкованных изделий. При объеме использования 10000 тонн цинка в год 20%-ная экономия составляет 2000 тонн. При стоимости 1 тонны цинка 4000$ США 20%-ная экономия составляет 2000×2000 =2 млн долл. США.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кечин В. А., Люблинский Е. Я. Цинковые сплавы. М. : Металлургия, 1986. 247 с.

2. Пономарева А. А., Пучков Б. И. Современное состояние промышленности по обработке цинка за рубежом. М. : Цветметинформация, 1977. 51с.

3. Кузнецов Г. М., Барсуков А. Д., Кривошеева Г. Б. Расчет фазовых равновесий системы Al-Zn // Известия АН СССР. Металлы. 1986. № 5. С. 198–200.

4. Тонков Е. Ю. Фазовые диаграммы элементов при высоком давлении. М. : Наука, 1979. 192 с.

5. Слэндер С. Д., Бойд У. К. Коррозионная стойкость цинка. Пер. с англ. Под ред. Е. В. Проскуркина. М. : Металлургия, 176. 200 с.

6. Горбунов Н. С. Диффузионные цинковые покрытия. М. : Металлургия, 1972. 247 с.

7. Ройх И. Л., Колтунова Л. Н. Защитные вакуумные покрытия на стали. М. : Машиностроение, 1971. 280с.

8. Ганиев И. Н., Шарифзода Н. В., Бердиев А. Э., Давлатзода Ф. С., Якубов У. Ш. Коррозионно-электрохимическое поведение цинкового сплава ЦАМС4-1-2,5, легированного титаном, в водном растворе, содержащем NaCl // Металлы. 2022. № 6. С. 94–99.

9. Ganiev I. N., Rakhimova N. O., Kurbonova M. Z., Davlatzoda F. S., Yakubov U. Sh. Effect of titanium additions on the corrosion and electrochemical properties of aluminum alloy AB1 // Inorganic Materials. 2022. Т. 58. № 8. С. 893–897.

10. Ганиев И. Н., Нуров Н. Р., Якубов У. Ш., Ботуров К. Влияние висмута на коррозионно-электрохимическое поведение алюминиевого сплава АЖ5К10, в среде электролита NaCl // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. 2022. Т. 24. № 1. С. 62–69.

11. Ганиев И. Н., Додхоев Э. С., Якубов У. Ш. Коррозионно-электрохимическое поведение сплавов системы Mg-La в среде электролита NaCl // Вестник Казанского государственного технического университета им. А. Н. Туполева. 2021. Т. 77. № 1. С. 19–23.

12. Ганиев И. Н., Додхоев Э. С., Сафаров А. Г., Якубов У. Ш. Анодное поведение сплавов системы Mg-Ce в среде электролита NaCl // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. 2021. Т. 23. № 1. С. 13–19.

13. Ганиев И. Н., Аминбекова М. С., Эшов Б. Б., Муллоева Н. М., Якубов У. Ш. Анодное поведение свинцового сплава ССу3 с цинком в среде электролита NaCl // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2021. № 4 (38). С. 23–30.

14. Бокиев Л. А., Ганиев И. Н., Ганиева Н. И., Хакимов А. Х., Якубов У. Ш. Влияние лития на коррозионно-электрохимическое поведение алюминиевого сплава АЖ5К10 в среде электролита NaCl // Вестник Тверского государственного университета. Серия: Химия. 2019. № 3 (37). С. 79–89.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Об авто*рах:

Ганиев Изатулло Наврузович – д.х.н., профессор, академик НАН Таджикистана, зав. лабораторией «Коррозионностойкие материалы» Института химии имени В. И. Никитина Национальной академии наук Таджикистана (734063, г. Душанбе, проспект Айни, 299/2), e-mail: ganievizatullo48@gmail.com;

Махсумов Зухуриддин Дилшодович – соискатель Дангаринского государственного университета (735320, г. Дангара, ул. Маркази, 25), тел.: (+992) 90-252-52-86, e-mail: dilshodzoda.zukhriddin.98@mail.ru

Давлатзода Фирузи Сулаймони – к.т.н., декан естественно-математического факультета и современных технологий Дангаринского государственного университета (735320, г. Дангара, ул. Маркази, 25), тел.: (+992) 93-123-83-38, e-mail: fsulaymoni@mail.ru

Якубов Умарали Шералиевич – д.т.н. (PhD), ведущий научный сотрудник лаборатории «Материаловедение» Института химии имени В. И. Никитина Национальной академии наук Таджикистана (734063, г. Душанбе, проспект Айни, 299/2), e-mail: yakubovumarali@gmail.com

Окилов Шахром Шукурбоевич – к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории «Коррозионностойкие материалы» Института химии В. И. Никитина Национальной академии наук Таджикистана (734063, г. Душанбе, ул. Айни, 299/2), тел.: (+992) 93-300-60-76, e-mail: Okilov70070@mail.ru

Рашидов Акрам Раджабович – к.т.н., старш. преп. кафедры «Автоматизированный электропривод» Института энергетики Таджикистана (735162, Респ. Таджикистан, обл. Хатлон, г. Бохтариен, ул. Носири Хусрав), e-mail: rashidov0909@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Изатулло Наврузович Ганиев – научное руководство, анализ результатов исследований

Зухуриддин Дилшодович Махсумов – постановка исследовательской задачи, концептуализация исследования, экспериментальные исследования

Фирузи Сулаймони Давлатзода – обработка и анализ их результатов, постановка задачи, доработка текста, сбор и теоретический анализ данных

Умарали Шералиевич Якубов – подготовка текста, формулирование выводов, экспериментальные исследования, обработка и анализ их результатов

Шахром Шукурбоевич Окилов – поставка задачи, доработка текста
Акрам Раджабович Рашидов – обработка и анализ результатов

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

ANODIC BEHAVIOR OF Zn-Nb ALLOY SYSTEM IN NACL SOLUTION

Izatullo N. Ganiev[1], Zuhuriddin D. Makhsumov[2], Firuzi S. Davlatzoda[2], Umarali Sh. Yakubov[1], Shakhrom Sh. Okilov[1], Akram R. Rashidov[3]

[1] V.I. Nikitin Institute of Chemistry, National Academy of Sciences of Tajikistan
[2] Dangara State University
[3] Energy Institute of Tajikistan

* for correspondence: yakubovumarali@gmail.com

Abstract.
Modern scientific and technological progress contributes to the rapid development of non-ferrous metallurgy. In the overall production volume of non-ferrous metals widely used in industry, zinc ranks fourth. Due to its specific properties, zinc and its alloys have found extensive application both as structural and non-structural materials. A significant portion of produced metallic zinc is used for coating metal sheets, as well as for manufacturing semi-finished products and shaped castings. In recent years, zinc-based alloys have been widely used to produce cast sacrificial anodes applied to protect marine vessels and structures from corrosion. The expansion of applications for zinc products is creating new challenges for specialists involved in the production and use of new zinc-based alloys. One of the alloying additions used in zinc alloys is niobium. It has been reported that niobium (up to 0.1 wt.%) increases hardness while reducing ductility and corrosion resistance of zinc. The niobium (Nb) content in wrought zinc-based alloys is usually very low and typically reaches up to 0.1-0.3 wt.%. Due to the contradictory data regarding the effect of niobium on the corrosion resistance of zinc, we investigated the influence of niobium additions up to 0.5 wt.% on the corrosion and electrochemical behavior of high-purity zinc in a NaCl solution. The electrochemical behavior of Zn–Nb alloys was studied using the potentiodynamic polarization method at a potential scan rate of 2 mV/s in a NaCl solution. It was established that increasing the niobium concentration leads to a shift of the free corrosion potential, as well as the repassivation and pitting potentials, toward more positive values. An increase in the concentration of chloride ions in the NaCl solution results in a shift of the electrochemical potentials of Zn–Nb alloys toward more negative values. It was shown that the addition of niobium reduces the corrosion rate of zinc in a NaCl medium by 20%.

CC BY

Article info
Received:
20 February 2026

Accepted for publication:
01 September 2026

Accepted:
15 September 2026

Keywords: *Zn-Nb system alloys, potentiostatic method, NaCl solution, corrosion potential, pitting potential, corrosion rate, microstructure*

For citation: Ganiev I.N., Makhsumov Z.D., Davlatzoda F.S., Yakubov U.Sh., Okilov Sh.Sh., Rashidov A.R. Anodic behavior of Zn-Nb system alloys in a NaCl solution. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2026; 4(176):98-106. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2026-4-98-106, EDN: DRWBST

REFERENCES

1. Kechin V.A., Lyublinskiy E.Ya. Zinc Alloys. Moscow: Metallurgiya; 1986. 247 p.
2. Ponomareva A.A., Puchkov B.I. Current State of the Zinc Processing Industry Abroad. Moscow: Tsvetmetinformatsiya; 1977. 51 p.
3. Kuznetsov G.M., Barsukov A.D., Krivosheeva G.B. Calculation of phase equilibria in the Al–Zn system. *Izvestiya AN SSSR. Metally (Proceedings of the USSR Academy of Sciences. Metals).* 1986; 5:198-200.
4. Tonkov E.Yu. Phase Diagrams of Elements at High Pressure. Moscow: Nauka; 1979. 192 p.
5. Slender S.D., Boyd W.K. Corrosion Resistance of Zinc. Translated from English. Edited by E.V. Proskurkin. Moscow: Metallurgiya; 1976. 200 p.
6. Gorbunov N.S. Diffusion Zinc Coatings. Moscow: Metallurgiya; 1972. 247 p.

7. Roykh I.L., Koltunova L.N. Protective Vacuum Coatings on Steel. Moscow: Mashinostroenie; 1971. 280 p.

8. Ganiev I.N., Sharifzoda N.V., Berdiev A.E., Davlatzoda F.S., Yakubov U.Sh. Corrosion and electrochemical behavior of zinc alloy TsAMS4-1-2.5 alloyed with titanium in an aqueous NaCl solution. *Metally (Russian Metallurgy).* 2022; 6:94-99.

9. Ganiev I.N., Rakhimova N.O., Kurbonova M.Z., Davlatzoda F.S., Yakubov U.Sh. Effect of titanium additions on the corrosion and electrochemical properties of aluminum alloy AB1. *Inorganic Materials.* 2022; 58(8):893-897.

10. Ganiev I.N., Nurov N.R., Yakubov U.Sh., Boturov K. Effect of bismuth on the corrosion and electrochemical behavior of aluminum alloy AZh5K10 in NaCl electrolyte. *Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Mechanical Engineering, Materials Science.* 2022; 24(1):62-69.

11. Ganiev I.N., Dodkhoev E.S., Yakubov U.Sh. Corrosion and electrochemical behavior of Mg-La system alloys in NaCl electrolyte. *Bulletin of Kazan State Technical University named after A.N. Tupolev.* 2021; 77(1):19-23.

12. Ganiev I.N., Dodkhoev E.S., Safarov A.G., Yakubov U.Sh. Anodic behavior of Mg-Ce system alloys in NaCl electrolyte. *Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Mechanical Engineering, Materials Science.* 2021; 23(1):13-19.

13. Ganiev I.N., Aminbekova M.S., Eshov B.B., Mulloeva N.M., Yakubov U.Sh. Anodic behavior of SSU3 lead alloy with zinc in NaCl electrolyte. *Bulletin of the Siberian State Industrial University.* 2021; 4(38):23-30.

14. Bokiev L.A., Ganiev I.N., Ganieva N.I., Khakimov A.Kh., Yakubov U.Sh. Effect of lithium on the corrosion and electrochemical behavior of aluminum alloy AZh5K10 in NaCl electrolyte. *Bulletin of Tver State University. Series: Chemistry.* 2019; 3(37):79-89.

© 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:

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

Zukhuriddin D. Makhsumov – Applicant of Dangara State University (735320, Dangara, Markazi St., 25), e-mail: dilshodzoda.zukhriddin.98@mail.ru

Firuzi S. Davlatzoda – Candidate of Technical Sciences, Dean of the Faculty of Natural Sciences, Mathematics and Modern Technologies, Dangara State University (735320, Dangara, Markazi St., 25), e-mail: fsulaymoni@mail.ru

Umarali Sh. Yakubov – Doctor (PhD) in Technical Sciences, Leading Researcher at the Materials Science Laboratory of the V.I. Nikitin Institute of Chemistry of the National Academy of Sciences of Tajikistan (734063, Dushanbe, Aini Avenue, 299/2), e-mail: yakubovumarali@gmail.com

Shakhrom Sh. Oqilov – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher of the Laboratory “Corrosion-Resistant Materials” at the V.I. Nikitin Institute of Chemistry of the National Academy of Sciences of Tajikistan (734063, Dushanbe, Aini Avenue, 299/2), e-mail: Okilov70070@mail.ru

Akram R. Rashidov– Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer at the Department of Automated Electric Drive, Institute of Energy of Tajikistan (735162, Republic of Tajikistan, Khatlon Region, Bokhtariyon, Nosiri Khusrav Street), e-mail: rashidov0909@mail.ru

Contribution of the authors:

Izatullo N. Ganiev – scientific supervision, analysis of research results

Zukhuriddin D. Makhsumov – formulation of the research problem, conceptualization of the study, experimental research

Firuzi S. Davlatzoda – data processing and analysis of results, problem formulation, text revision, data collection and theoretical analysis

Umarali Sh. Yakubov – manuscript preparation, formulation of conclusions, experimental research, data processing and analysis of results

Shakhrom Sh. Oqilov – problem formulation, text revision

Akram R. Rashidov – processing and analysis of results

All authors have read and approved the final manuscript.