

## ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

УДК 669.713:620.197

DOI: 10.34680/2076-8052.2025.3(141).484-494

Поступила в редакцию / Received 02.09.2025

ГРНТИ 53.37.29+53.01.97

Специальность ВАК 1.3.8.; 2.6.17.

Принята к публикации / Accepted 28.10.2025

Научная статья

### АНОДНОЕ ПОВЕДЕНИЕ СПЛАВОВ АЛЮМИНИЯ С КРЕМНИЕМ В СРЕДЕ ЭЛЕКТРОЛИТА NaCl

Бексеитова Г. К.<sup>1</sup>, Ганиев И. Н.<sup>2</sup>, Сафаров А. Г.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Физико-технический институт имени С. У. Умарова Национальной академии наук Таджикистана  
(Душанбе, Республика Таджикистан)*

<sup>2</sup> *Институт химии имени В. И. Никитина Национальной академии наук Таджикистана  
(Душанбе, Республика Таджикистан)*

**Аннотация.** Электрохимические и коррозионные характеристики алюминиевого сплава, модифицированного кремнием, были исследованы в среде NaCl с использованием потенциостатического метода в потенциодинамическом режиме. Скорость изменения потенциала при развертке составляла 2 мВ/с. Полученные зависимости свободного коррозионного потенциала от времени для исходного алюминия и кремнийсодержащих сплавов демонстрируют его смещение в сторону более положительных значений, что свидетельствует о повышении устойчивости материала к коррозии. Установлено, что увеличение содержания кремния в сплаве приводит к положительному сдвигу потенциалов свободной коррозии, репассивации и начала питтингового разрушения. В то же время повышение концентрации хлорид-ионов в растворе NaCl вызывает обратный эффект – электрохимический потенциал алюминиевых сплавов с кремнием смещается в отрицательную область. Это сопровождается ростом скорости коррозионных процессов вне зависимости от состава сплава, что подтверждает агрессивное воздействие хлоридов на алюминиевые материалы. Добавление кремния в различных концентрациях способствует увеличению коррозионной стойкости алюминиевого сплава марки А6, обеспечивая улучшение на 8–10% по сравнению с исходным материалом.

**Ключевые слова:** сплав алюминия А6, кремний, потенциостатический метод, электролит NaCl, потенциал коррозии, потенциал питтингообразования, скорость коррозии

**Для цитирования:** Бексеитова Г. К., Ганиев И. Н., Сафаров А. Г., Нуров Н. Р. Анодное поведение сплавов алюминия с кремнием в среде электролита NaCl // Вестник НовГУ. 2025. 3 (141). 484–494. DOI: 10.34680/2076-8052.2025.3(141).484-494

Research Article

### ANODIC BEHAVIOR OF ALUMINUM-SILICON ALLOYS IN NaCl ELECTROLYTE ENVIRONMENT

Bekseitova G. K.<sup>1</sup>, Ganiev I. N.<sup>2</sup>, Safarov A. G.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *S. U. Umarov Physical–Technical Institute of the National Academy of Sciences of Tajikistan  
(Dushanbe, Republic of Tajikistan)*

<sup>2</sup> *V. I. Nikitin Chemistry Institute of the Tajikistan Academy of Sciences (Dushanbe, Republic of Tajikistan)*

**Abstract.** The electrochemical and corrosion characteristics of silicon-modified aluminum alloy were investigated in a NaCl environment using a potentiostatic method in a potentiodynamic regime. The rate of potential change during the sweep was 2 mV/s. The obtained dependences of the free corrosion potential on time for the initial aluminum and silicon-containing alloys demonstrate its shift towards more positive values, which indicates an increase in the material's resistance to corrosion. It has been established that an increase in the silicon content in the alloy leads to a positive shift in the potentials of free corrosion,

repassivation, and the onset of pitting failure. At the same time, an increase in the concentration of chloride ions in the NaCl solution causes the opposite effect – the electrochemical potential of aluminum alloys with silicon shifts to the negative region. This is accompanied by an increase in the rate of corrosion processes, regardless of the alloy composition, which confirms the aggressive effect of chlorides on aluminum materials. The addition of silicon in various concentrations increases the corrosion resistance of A6 grade aluminum alloy, providing an improvement of 8-10% compared to the starting material.

**Keywords:** *aluminum alloy A6, silicon, potentiostatic method, NaCl electrolyte, corrosion potential, pitting potential, corrosion rate*

**For citation:** Bekseitova G. K., Ganiev I. N., Safarov A. G., Nurov N. R. Anodic behavior of aluminum-silicon alloys in NaCl electrolyte environment // Vestnik NovSU. 3 (141). 484–494. DOI: 10.34680/2076-8052.2025.3(141).484-494

## Введение

В настоящее время существенно возрастает интерес к проблемам повышения коррозионной стойкости конструкционных металлических сплавов, особенно в условиях эксплуатации в агрессивных средах. Актуальность данной темы обусловлена необходимостью увеличения срока службы материалов и повышения надежности конструктивных элементов, используемых в строительстве, машиностроении, авиационной и транспортной промышленности [1, с. 21–24; 2, 3].

Алюминиевые сплавы находят широкое применение в различных отраслях техники благодаря высокому соотношению прочности к массе, хорошей технологичности и коррозионной стойкости. Особенно востребованы они в авиационной промышленности, где предъявляются высокие требования к легкости и надежности конструкционных материалов. Алюминиевые сплавы применяются при изготовлении силовых элементов планера, обшивки, крепежных деталей и других конструктивных компонентов летательных аппаратов. Однако их эксплуатация в условиях повышенной влажности, соляных аэрозолей и других агрессивных факторов требует обеспечения достаточной устойчивости к коррозионному разрушению [4, 5].

Особый интерес представляют литейные сплавы системы алюминий-кремний (силумины), которые используются в производстве фасонных отливок, применяемых в автомобильной, тракторной, авиационной и строительной отраслях. Наилучшими литейными свойствами обладают сплавы Al-Si, в эвтектическом составе которых содержатся кристаллы почти чистого кремния и твердый раствор алюминия. При увеличении содержания кремния наблюдается повышение прочности, однако снижается пластичность материала. Химический состав и свойства алюминиевых литейных сплавов регламентированы стандартами, в том числе ГОСТ 1583-93 [6, 7].

Изучение анодного поведения алюминиево-кремниевых сплавов в различных электролитах представляет научный и практический интерес с точки зрения оценки их коррозионной стойкости и разработки мероприятий по ее повышению.

*Цель настоящего исследования* направлена на всестороннее изучение анодных характеристик алюминиевого сплава, модифицированного кремнием, в условиях

воздействия электролитической среды на основе хлорида натрия (NaCl) с различным уровнем концентрации. Основное внимание уделяется анализу влияния содержания кремния и концентрации хлорид-ионов на электрохимическое поведение материала.

### Экспериментальная часть

Бинарные алюминиево-кремниевые сплавы получали легированием алюминия марки А6 металлическим кремнием КРО. Процесс осуществлялся в лабораторных шахтных печах сопротивления типа СШОЛ при температурном диапазоне 800–950°C. Концентрация кремния в исходных составах варьировалась от 0,5 до 1,5 мас.%. Из расплавов были сформированы цилиндрические образцы диаметром 8 мм и длиной 140 мм, отлитые в графитовые формы, предназначенные для последующего электрохимического анализа.

Химический состав полученных сплавов определялся в Центральной лаборатории ГУП «TALCO» с применением стандартных методов анализа компонентов. Для изучения электрохимических характеристик использовался потенциостатический метод, подробно описанный в литературе [8–10]. Испытания проводились в потенциодинамическом режиме на приборе ПИ-50-1.1 с постоянной скоростью развертки потенциала 2 мВ/с. В качестве среды использовался водный раствор NaCl. Сравнительным электродом служил хлорид-серебряный, а вспомогательным – платиновый.

Особое внимание в эксперименте уделялось подготовке поверхности образцов, поскольку она оказывает значительное влияние на точность измерения потенциала. Применялись два метода обработки:

- механическая подготовка включала последовательную шлифовку поверхности наждачной бумагой от крупнозернистой к мелкозернистой (№ 2 до № 00), промывку дистиллированной водой, полировку на влажной фильтровальной бумаге и последующую сушку на воздухе;
- химическая обработка проводилась после механической подготовки и включала обезжиривание поверхности в 10% растворе серной кислоты ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) в течение одной минуты, а затем катодную поляризацию при плотности тока 2 мА/см<sup>2</sup> в течение 20 минут, что обеспечивало эффективное удаление оксидной пленки с поверхности электрода.

Установлено, что спустя определенный временной интервал свободный коррозионный потенциал (также называемый потенциалом самопроизвольного тока) стабилизируется и достигает устойчивого значения, вне зависимости от способа предварительной обработки поверхности электрода.

В дальнейшем для проведения электрохимических испытаний была выбрана механическая подготовка поверхности как основной метод. Одновременно осуществлялась регистрация потенциодинамических кривых, а также проводилась

катодная поляризация, направленная на удаление оксидных слоев с поверхности металла. Коррозионные диаграммы, отражающие поляризационные процессы, должны учитывать не только активные стадии разрушения, но и изменения, происходящие в условиях формирования защитных пассивных пленок.

В связи с этим была разработана и применена подробная методика регистрации поляризационных кривых алюминиевого сплава марки А6 в 3% водном растворе NaCl (рисунок 1). При отсутствии внешнего тока поляризации металл находится в состоянии равновесия, соответствующем свободному коррозионному потенциалу  $E_{ср.кор.}$  (рисунок 1, кривая I), который характеризует область активного растворения материала.

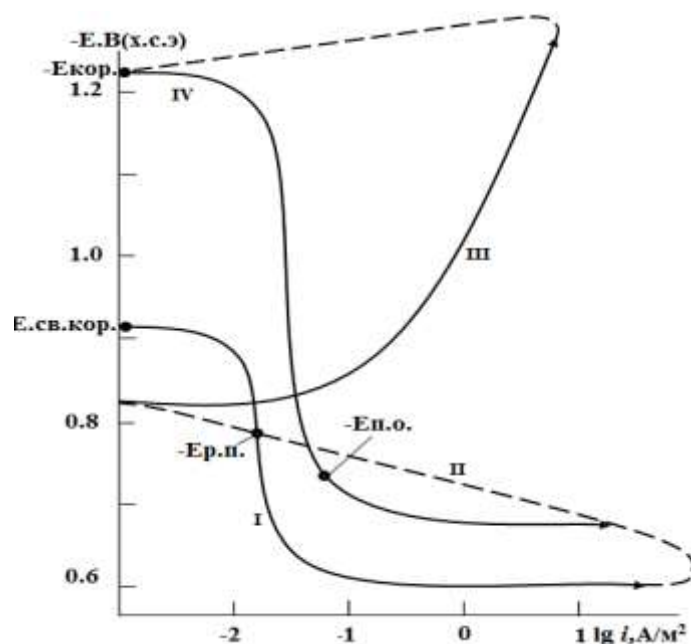


Рисунок 1. Кривая коррозионного поведения сплава алюминия марки А6 в растворе NaCl (3%) при скорости сканирования 2 мВ/с

По мере увеличения плотности тока наблюдается смещение стационарного потенциала в положительную сторону, что соответствует переходу металла в пассивное состояние, при котором скорость растворения существенно снижается. Далее образцы подвергались поляризации в отрицательном направлении (рисунок 1, кривые II и III) до потенциала  $(-1250)$  В, что обеспечивало разрушение оксидной пленки и активацию поверхности. После этого проводилась повторная поляризация в положительном направлении, в результате чего были получены анодные поляризационные кривые (рисунок 1, кривая IV).

Все четыре потенциодинамические кривые были зарегистрированы в одинаковых условиях – в 3% растворе хлорида натрия, что позволило объективно оценить электрохимическое поведение алюминиевого сплава при различных стадиях коррозионного процесса.

В ходе регистрации полной поляризационной кривой были определены ключевые электрохимические параметры, характеризующие коррозионную активность алюминиево-кремниевых сплавов:

- Ест. или Есв.кор. – свободный коррозионный потенциал, отражающий начальное состояние поверхности;
- Ер.п. – потенциал репассивации, указывающий на способность материала восстанавливать защитные свойства;
- Еп.о. – потенциал начала питтинговой коррозии, свидетельствующий о переходе к локализованному разрушению;
- Екор. – коррозионный потенциал, определяющий термодинамическую склонность к окислению;
- $i_{р.п.}$  – плотность коррозионного тока, отражающая интенсивность электрохимического процесса.

Снижение скорости коррозии в исследуемых условиях обусловлено ослаблением катодной реакции, которая в нейтральной среде контролируется процессом восстановления кислорода. Расчет плотности коррозионного тока осуществлялся по катодной ветви потенциодинамической кривой с использованием Тафелевской константы, принятой равной 0,12 В. Скорость коррозии  $K$  вычислялась по формуле:

$$K = i_{кор} \cdot k,$$

где  $k = 0,335 \text{ г/А} \cdot \text{ч}$  – электрохимический эквивалент алюминия [10].

Эксперименты проводились в соответствии с требованиями ГОСТ 9.905–2007 в 3% растворе NaCl, имитирующем морскую воду, с целью оценки влияния хлорид-ионов на электрохимическую устойчивость алюминия, легированного кремнием.

В таблицах 1 и 2, а также на рисунке 2 представлены основные электрохимические характеристики сплавов, определяющие их коррозионное поведение. Временные зависимости свободного коррозионного потенциала, полученные как в 3% растворе NaCl (таблица 1), так и в более разбавленных растворах – 0,03% и 0,3% NaCl (рисунок 2), демонстрируют устойчивое смещение потенциала в положительную сторону по мере увеличения времени, независимо от содержания кремния в сплаве.

Таблица 1. Изменение потенциала свободной коррозии (-Есв.кор., В) во времени для сплава Al–Si в среде NaCl (3%)

Время выдержки, минут	Содержания кремния в сплаве, мас. %				
	А6	0,5	0,8	1,0	1,5
0	1,012	1,006	0,994	0,979	0,973
0,15	1,002	0,995	0,983	0,970	0,966
0,2	0,991	0,984	0,972	0,964	0,955
0,3	0,982	0,974	0,963	0,956	0,945
0,4	0,973	0,965	0,954	0,949	0,936
0,5	0,965	0,956	0,946	0,942	0,926
0,6	0,952	0,948	0,938	0,934	0,917
2	0,946	0,940	0,931	0,925	0,909
3	0,940	0,933	0,924	0,917	0,902
4	0,935	0,926	0,917	0,910	0,896
5	0,933	0,920	0,911	0,902	0,890
10	0,929	0,914	0,905	0,895	0,884
20	0,925	0,909	0,900	0,890	0,879
30	0,922	0,905	0,896	0,886	0,875
40	0,919	0,902	0,893	0,883	0,873
50	0,917	0,901	0,891	0,882	0,871
60	0,916	0,901	0,890	0,882	0,870

Дополнительно установлено, что увеличение концентрации кремния способствует положительному сдвигу свободного коррозионного потенциала. Через 20–30 минут после начала испытаний потенциал стабилизируется и достигает постоянного значения, что подтверждается данными таблицы 1 и рисунка 2.

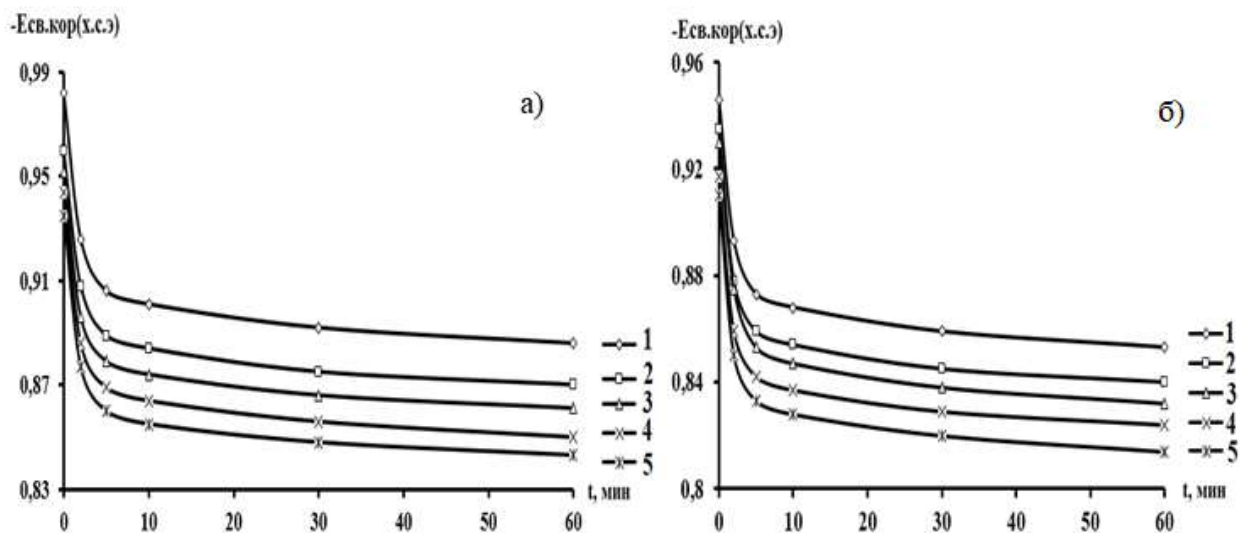


Рисунок 2. Потенциал свободной коррозии (-Есв.кор., В) алюминиевого сплава, легированного Si, в 0,03% (а) и 0,3% (б) NaCl

Таблица 2 содержит обобщенные результаты исследования коррозионно-электрохимического поведения алюминиевого сплава, легированного кремнием, в водных растворах NaCl с различной концентрацией. Измерения проводились при скорости развертки потенциала 2 мВ/с. Анализ данных показал, что увеличение содержания кремния в сплаве приводит к смещению потенциалов коррозии, репассивации и начала питтинговой коррозии в положительную область, что свидетельствует о повышении устойчивости материала к электрохимическому разрушению.

Таблица 2. Анализ коррозионно-электрохимических характеристик алюминиевого сплава Al–Si в водном растворе NaCl

Среда NaCl, мас. %	Содержание Si в сплаве, мас. %	Электрохимические потенциалы, В				Скорость коррозии	
		-E <sub>св.кор.</sub>	-E <sub>кор.</sub>	-E <sub>п.о.</sub>	-E <sub>р.п.</sub>	i <sub>кор.</sub> , А/м <sup>2</sup>	K · 10 <sup>3</sup> , г/м <sup>2</sup> ·ч
0,03	-	0,853	1,098	0,597	0,717	5,3	17,7
	0,5	0,841	1,086	0,588	0,712	5,1	17,0
	0,8	0,832	1,071	0,576	0,706	4,9	16,4
	1,0	0,823	1,053	0,563	0,701	4,7	15,7
	1,5	0,813	1,038	0,550	0,697	4,5	15,0
0,3	-	0,886	1,171	0,676	0,765	7,1	23,7
	0,5	0,871	1,166	0,662	0,759	6,9	23,1
	0,8	0,860	1,150	0,651	0,752	6,7	22,4
	1,0	0,851	1,133	0,644	0,747	6,5	21,7
	1,5	0,843	1,121	0,638	0,740	6,3	21,1
3	-	0,916	1,233	0,731	0,793	8,6	28,8
	0,5	0,901	1,222	0,719	0,784	8,4	28,1
	0,8	0,890	1,213	0,710	0,775	8,2	27,4
	1,0	0,882	1,201	0,700	0,767	8,0	26,8
	1,5	0,870	1,193	0,694	0,763	7,8	26,1

Во всех трех исследованных концентрациях электролита (0,03%, 0,3% и 3% NaCl) добавление кремния в алюминий марки А6 до уровня 1,5 мас.% способствует снижению скорости коррозии на 8–10%, что подтверждается данными таблицы 2.

Анодные участки потенциодинамических кривых для алюминиево-кремниевых сплавов представлены на рисунке 3. Переход кривых в область положительных потенциалов указывает на снижение интенсивности анодного растворения, что отражает формирование пассивного состояния поверхности и усиление защитных свойств материала.

На рисунке 4 представлена температурная зависимость скорости коррозии алюминиево-кремниевых сплавов в водных растворах NaCl с концентрацией 0,03%, 0,3% и 3,0%.

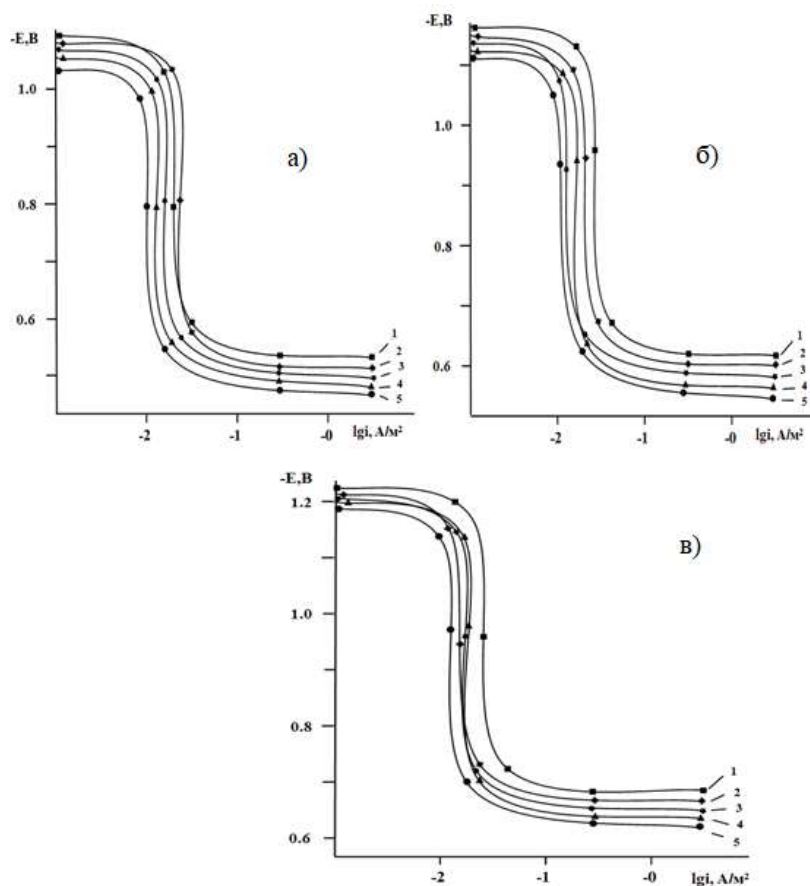


Рисунок 3. Расположение анодных поляризационных кривых (при развертке 2 мВ/с) алюминиевого сплава (1) с различными содержаниями Si (мас.%): 2 – 0,5; 3 – 0,8; 4 – 1,0; 5 – 1,5, в растворах NaCl: 0,03% (а), 0,3% (б), 3% (в)

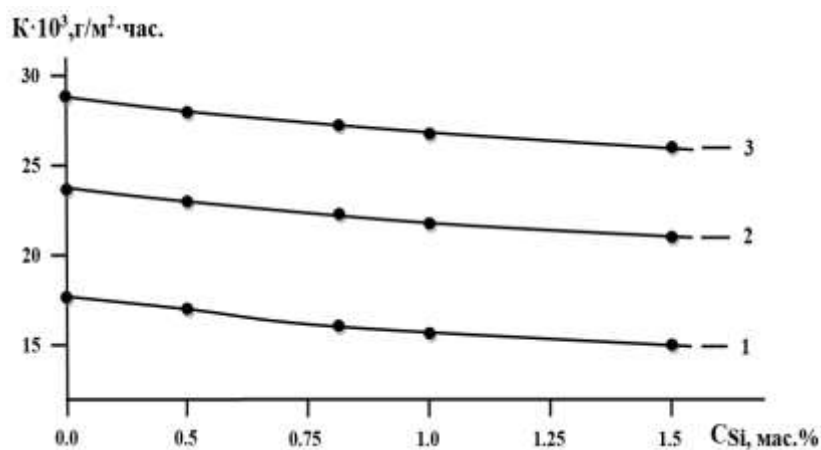


Рисунок 4. Влияние концентрации Si на скорость коррозии сплава Al в растворах NaCl различной концентрации: 1 – 0,03%, 2 – 0,3%, 3 – 3,0%

Полученные данные демонстрируют, что увеличение содержания хлорид-ионов в электролите приводит к усилению коррозионных процессов – этот эффект наглядно иллюстрируется на рисунке 5. Хлорид-ионная агрессия способствует ускоренному



разрушению поверхности сплавов, независимо от их состава. При этом наименьшие значения скорости коррозии и плотности коррозионного тока наблюдаются у образцов, содержащих 1,5 мас.% кремния. Это указывает на оптимальный уровень легирования, при котором достигается максимальная устойчивость алюминиевого сплава к электрохимическому воздействию в хлоридной среде.

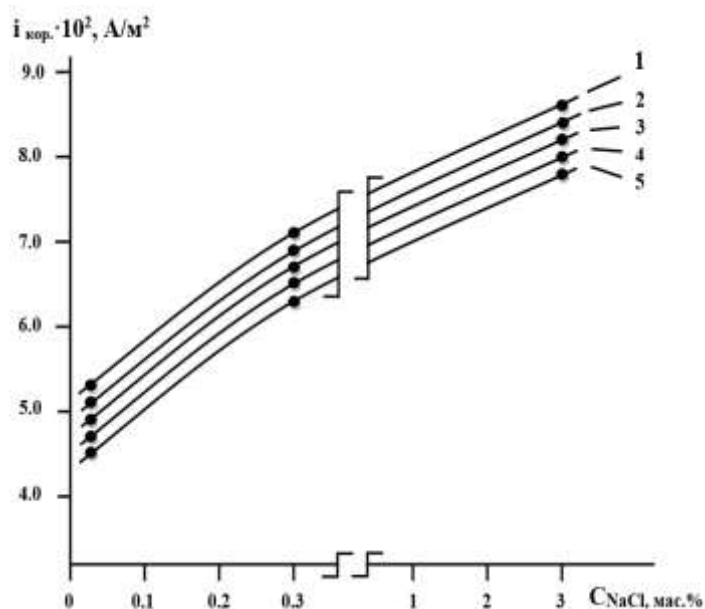


Рисунок 5. Влияние концентрации NaCl на плотность тока коррозии сплава Al–Si (1), при различных содержаниях Si (мас.%): 2 – 0,5; 3 – 0,8; 4 – 1,0; 5 – 1,5

### Заключение

Проведенные исследования подтверждают, что легирование является одним из наиболее эффективных методов повышения коррозионной стойкости алюминиевых сплавов. Установлено, что добавление кремния к алюминию способствует формированию более устойчивой к коррозии структуры. Так, введение кремния в количестве нескольких процентов приводит к увеличению коррозионной стойкости сплава алюминия марки А6 на 8–10%.

При многократном увеличении концентрации хлорид-ионов в растворе NaCl – в 10 и 100 раз – наблюдается отчетливое смещение потенциала начала питтинговой коррозии в отрицательную область (таблица 2). Такое поведение сопровождается заметным ростом скорости анодного растворения. Для сплава, содержащего 1,5 мас.% кремния, скорость коррозии возрастает от 15 г/м²·ч в 0,03% растворе NaCl до 26,1 г/м²·ч при концентрации NaCl, увеличенной в 100 раз. Это подтверждает, что высокая концентрация хлорид-ионов существенно усиливает коррозионные процессы, преобладая над защитным эффектом легирования кремнием.

Таким образом, агрессивность среды оказывает значительное влияние на устойчивость алюминиево-кремниевых сплавов к коррозионному разрушению.

Полученные данные имеют практическую значимость при выборе материалов для конструктивных элементов, работающих в условиях повышенной влажности и соледержащей атмосферы. Особенно это актуально для авиационной промышленности, где эксплуатация изделий из алюминиевых сплавов осуществляется в условиях перепадов температур, высоких нагрузок и агрессивного атмосферного воздействия. Использование алюминий-кремниевых сплавов с оптимальным содержанием кремния позволяет повысить надежность и долговечность авиационных конструкций, снизить риски коррозионного разрушения и, как следствие, обеспечить безопасность и эффективность эксплуатации летательных аппаратов.

### Список литературы

1. Коррозия и электрохимия цветных металлов и сплавов: тематический отраслевой сборник. Москва: Металлургия, 1982. 86 с.
2. Луц А. Р., Суслина А. А. Алюминий и его сплавы: учебное пособие. Самара: Самарский государственный технический университет, 2013. 81 с.
3. Альтман М. Б. Металлургия литейных алюминиевых сплавов. Москва: Металлургия. 1977. 240 с.
4. Скорчеллетти В. В. Теоретические основы коррозии металлов. Ленинград: Химия. 1973. 263 с.
5. Колотыркин Я. М. Металл и коррозия. Москва: Металлургия. 1985. 88 с.
6. Никаноров С. П., Кардашев Б. К., Корчунов Б. Н., Осипов В. Н., Голяндин С. Н. Структура и физико-механические свойства Al-Si-сплавов // Журнал технической физики. 2010. 80 (4). 71–76.
7. Шепелевич В. Г., Гусакова О. В., Гусакова С. В. Влияние скорости охлаждения на структурно-фазовое состояние сплава Al-Si, легированного металлами // Физика и химия обработки материалов. 2023. 3. 63–71. DOI: 10.30791/0015-3214-2023-3-63-71
8. Ходжаназаров Х. М. Влияние щелочных металлов на коррозионно-электрохимическое поведение свинцовых баббитов Б(PbSb15Sn10) в среде раствора NaCl // Коррозия: защита, материалы. Приложение к журналу «Технология металлов». 2025. 14. 17–24. DOI: 10.31044/1684-2499-2025-0-14-17-24
9. Махмудзода М., Эшов Б. Б., Джайлоев Дж. Х. Анодное поведение алюминиевого сплава АК7 и композиционного материала системы Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в среде раствора электролита NaCl // Металлург. 2023. 10. 39–42.
10. Ганиев И. Н., Саидов М. М., Файзуллоев У. Н., Ходжаназаров Х. М. Анодное поведение алюминиевого сплава АМ4.5Мг1 типа дюралюмин, легированного празеодимом, в растворе NaCl // Практика противокоррозионной защиты. 2024. 29 (1). 37–45. DOI: 10.31615/j.corros.prot.2024.111.1-4

### References

1. Corrosion and electrochemistry of non-ferrous metals and alloys: a thematic industry collection. Moscow: Metallurgiya Publ., 1982. 86 p. (In Russian).
2. Lutz A. R., Suslina A. A. Aluminum and its alloys: a textbook. Samara: Samara State Technical University Publ., 2013. 81 p. (In Russian).

3. Altman M. B. Metallurgy of foundry aluminum alloys. Moscow: Metallurgiya Publ., 1977. 240 p. (In Russian).
4. Scorcelletti V. V. Theoretical foundations of metal corrosion. Leningrad: Chemistry Publ., 1973. 263 p. (In Russian).
5. Kolotyarkin Ya. M. Metal and corrosion. Moscow: Metallurgiya Publ., 1985. 88 p. (In Russian).
6. Nikanorov S. P., Kardashev B. K., Korchunov B. N., Osipov V. N., Golyandin S. N. Structure and physicomechanical properties of Al-Si alloys // Technical physics. 2010. 55 (4). 503–508.
7. Shepelevich V., Gusakova O., Husakova S. Effect of the melt cooling rate on the structural-phase state of the Al-Si alloy doped with metals // Fizika i khimiya obrabotki materialov. 2023. 3. 63–71. DOI: 10.30791/0015-3214-2023-3-63-71 (In Russian).
8. Khodzhanazarov Kh. M. Effect of alkali metals on corrosion-electrochemical behavior of lead babbitts b (PbSb15Sn10) in NaCl solution medium // Corrosion: protection, materials. Appendix to journal "Technology of metals". 2025. 14. 17–24. DOI: 10.31044/1684-2499-2025-0-14-17-24 (In Russian).
9. Mahmudzoda M., Eshov B. B., Jayloev Ja. H. Anode behavior of AK7 aluminum alloy and composite material of the Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> system in the medium of a NaCl electrolyte solution // Metallurg. 2023. 10. 39–42. (In Russian).
10. Ganiev I. N., Saidov M. M., Faizulloev U. N., Khojanazarov K. M. Anodic behavior of aluminum alloy AM4.5MG1 of the duralumin type, alloyed with praseodymium, in a NaCl solution // Theory and practice of corrosion protection. 2024. 29 (1). 37–45. DOI: 10.31615/j.corros.prot.2024.111.1-4 (In Russian).

### Сведения об авторах

*Бексеитова Гульмира Копшиловна* – соискатель, Физико-технический институт имени С. У. Умарова Национальной академии наук Таджикистана (Душанбе, Республика Таджикистан), ORCID: 0009-0004-5926-3232, g.bekseitova@agakaz.kz

*Ганиев Изатулло Наврузович* – доктор химических наук, профессор, заведующий лабораторией, Институт химии имени В. И. Никитина Национальной академии наук Таджикистана (Душанбе, Республика Таджикистан), ORCID: 0000-0002-2791-6508, ganievizatullo48@gmail.com

*Сафаров Амиршо Гоибович* – доктор технических наук, главный научный сотрудник, Физико-технический институт имени С. У. Умарова Национальной академии наук Таджикистана (Душанбе, Республика Таджикистан), ORCID: 0009-0009-8517-3405, amirsho71@mail.ru