

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Влияние висмута на коррозионно-электрохимическое поведение алюминиевого сплава АЖ5К10 в среде электролита NaCl / И.Н. Ганиев, Н.Р. Нуров, У.Ш. Якубов, К. Ботуров // Вестник ПНИПУ. Машиностроение. Материаловедение. – 2022. – Т. 24, № 1. – С. 62–69. DOI: 10.15593/2224-9877/2022.1.08

Please cite this article in English as:

Ganiev I.N., Nurov N.R., Yakubov U.Sh., Boturov K. Influence of Bismuth on Corrosion-Electrochemical Behavior of Aluminum Alloy Al5Fe10Si, in the Medium of Electrolyte NaCl. *Bulletin of PNRPU. Mechanical engineering, materials science*. 2022, vol. 24, no. 1, pp. 62-69. DOI: 10.15593/2224-9877/2022.1.08

---

**ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение**  
**Т. 24, № 1, 2022**  
**Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science**  
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

---

Научная статья

DOI: 10.15593/2224-9877/2022.1.08

УДК 669.017:620.197

**И.Н. Ганиев<sup>1</sup>, Н.Р. Нуров<sup>2</sup>, У.Ш. Якубов<sup>1</sup>, К. Ботуров<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Институт химии имени В.И. Никитина

Национальной академии наук Таджикистана, Душанбе, Таджикистан

<sup>2</sup>Технический колледж Таджикского технического

университета имени М.С. Осими, Душанбе, Таджикистан

<sup>3</sup>Физико-технический институт имени С.У. Умарова

Национальной академии наук Таджикистана, Душанбе, Таджикистан

**ВЛИЯНИЕ ВИСМУТА НА КОРРОЗИОННО-  
ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ АЛЮМИНИЕВОГО  
СПЛАВА АЖ5К10 В СРЕДЕ ЭЛЕКТРОЛИТА NaCl**

Борьба с коррозией металлов является важнейшей задачей современной техники. Одним из методов защиты от коррозии подземных коммуникаций и техники является использование анодной защиты с помощью протекторов. В качестве анодного материала возможно использование алюминиевых сплавов с высоким отрицательным потенциалом. В работе потенциостатическим методом при скорости развертки потенциала 2 мВ/с исследовано анодное поведение алюминиевого сплава АЖ5К10, легированного висмутом, в среде электролита NaCl. Зависимость изменения потенциала свободной коррозии от времени исходного сплава АЖ5К10 и сплавов с висмутом показывают смещение потенциала в положительную область. При этом потенциал свободной коррозии у сплава с 1,0 масс.% висмутом имеет более положительное значение по сравнению с исходным сплавом. Отмечено, что рост концентрации висмута приводит к смещению потенциала свободной коррозии в область положительных значений. Добавка легирующего компонента (висмута) к сплаву АЖ5К10 в средах электролита 0,03; 0,3 и 3,0%-ного NaCl сдвигает потенциалы коррозии и питтингообразования сплавов в положительную область значений. При этом потенциал репассивации также смещается в положительную область в нейтральных средах, что свидетельствует об улучшении пассивируемости образующихся питтинговых коррозионных очагов. Показано, что с увеличением концентрации хлорид-иона в электролите NaCl наблюдается смещение в отрицательную область значений потенциалов свободной коррозии, питтингообразования и репассивации сплавов. Скорость коррозии сплавов, независимо от их состава, растет с ростом концентрации хлорид-иона. Добавки висмута снижают скорость коррозии исходного сплава на 30–40 %. Сравнение электрохимических потенциалов изученных сплавов показывают возможность использования их в качестве протектора при защите от коррозии стальных конструкций и изделий.

**Ключевые слова:** алюминиевый сплав АЖ5К10; висмут; потенциостатический метод; электролит NaCl; потенциалы питтингообразования и коррозии.

I.N. Ganiev<sup>1</sup>, N.R. Nurov<sup>2</sup>, U.Sh. Yakubov<sup>1</sup>, K. Boturov<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Institute of Chemistry named after V.I. Nikitin  
National Academy of Sciences of Tajikistan, Dushanbe, Tajikistan

<sup>2</sup>Technical College Tajik Technical University  
named after M.S. Osimi, Dushanbe, Tajikistan

<sup>3</sup>Physico-Technical Institute named after S.U. Umarov  
National Academy of Sciences of Tajikistan, Dushanbe, Tajikistan

## INFLUENCE OF BISMUTH ON CORROSION-ELECTROCHEMICAL BEHAVIOR OF ALUMINUM ALLOY Al5Fe10Si, IN THE MEDIUM OF ELECTROLYTE NaCl

The fight against corrosion of metals is the most important task of modern technology. One of the methods of protection against corrosion of underground utilities and equipment is the use of anodic protection using protectors. It is possible to use aluminum alloys with a high negative potential as an anode material. The anodic behavior of the bismuth-doped aluminum alloy Al5Fe10Si in the NaCl electrolyte medium was studied using the potentiostatic method at a potential sweep rate of 2 mV/s. The dependence of the change in the free corrosion potential on the time of the initial alloy Al5Fe10Si and alloys with bismuth show a potential shift towards the positive region. At the same time, the potential for free corrosion of an alloy with 1.0 wt% bismuth has a more positive value compared to the initial alloy. It is noted that an increase in the concentration of bismuth leads to a shift in the potential of free corrosion to the region of positive values. Additives of the alloying component (bismuth) to the Al5Fe10Si alloy in the electrolyte media 0.03; 0.3 and 3.0 % NaCl shifts the corrosion and pitting potentials of alloys to a positive range of values. In this case, the potential of repassivation also shifts to the positive region, which indicates an improvement in the passivability of the formed pitting corrosion foci in neutral media. It is shown that with an increase in the chloride ion concentration in the NaCl electrolyte, mixing in the negative region of the values of the potentials of free corrosion, pitting formation and alloys repassivation is observed. The corrosion rate of alloys, regardless of their composition, increases with an increase in the concentration of chloride ion. Bismuth additives reduce the corrosion rate of the initial alloy by 30-40%. Comparison of the electrochemical potentials of the studied alloys shows the possibility of using them as a protector for corrosion protection of steel structures and products.

**Keywords:** aluminum alloy Al5Fe10Si; bismuth; potentiostatic method; electrolyte NaCl; pitting and corrosion potentials.

### Введение

В настоящее время сплавы на основе алюминия широко применяются в качестве конструкционных материалов. С одной стороны, они демонстрируют уникальное сочетание важных эксплуатационных характеристик (прочности, пластичности, коррозионной стойкости и т.д.) с низкой плотностью в сравнении со сталью и медными сплавами. С другой стороны, алюминий – один из наиболее распространенных в природе элементов, занимает по содержанию в земной коре третье место (до 8 %). За последние годы происходило активное наращивание темпов его производства (более 60 млн т в год) и потребления (около 90 млн т в год), и теперь алюминий уверенно занимает первое место по этим показателям среди всех цветных металлов [1–3].

Известно, что сплавы эвтектических составов обладают наилучшими литейными свойствами. Наиболее распространенными из них являются силумины. Однако их физико-механические и некоторые эксплуатационные характеристики в настоящее время часто не удовлетворяют требованиям техники, а резервы их улучшения исчерпаны. Из-за низкой пластичности силуминовых детали, изготовленные из них, не выдерживают даже незначительные ударные нагрузки. Из этих сплавов сложно получить комбинированные детали – частично литые, частично деформированные [4; 5].

Железо представляет собой основную примесь в алюминиевых сплавах, при производстве первичного алюминия с помощью процесса Байера

и процесса электролитического восстановления Холла – Эру. Еще одним источником железа в алюминии может быть лом металлургического алюминия. В некоторые сплавы железо добавляется в качестве легирующего элемента для увеличения твердости, но оно также увеличивает хрупкость сплава [6].

Растворимость железа в твердом алюминии очень низкая и составляет 0,04 масс.% при 625 °C [7]. Поэтому железо образует интерметаллические фазы. В зависимости от химического состава и условий затвердевания микроструктура сплавов Al–Si может содержать следующие интерметаллические фазы:  $\alpha$ -Al<sub>18</sub>Fe<sub>2</sub>Si,  $\beta$ -Al<sub>5</sub>FeSi и  $\delta$ -Al<sub>9</sub>FeSi<sub>2</sub> в качестве первично кристаллизованных фаз.

Наиболее часто выделяющейся фазой в сплавах Al–Si является  $\beta$ -Al<sub>5</sub>FeSi. Фаза  $\beta$ -Al<sub>5</sub>FeSi отрицательно влияет на механические свойства. Иглы этой фазы имеют насечки в микроструктуре. Вдоль иглолок  $\beta$ -Al<sub>5</sub>FeSi могут появляться трещины [8].

Известно, что благодаря целому ряду сочетаний свойств висмут нашел применение в промышленности, металлургии, электронике и т.д. При легировании сплавов щелочноземельными металлами в результате изменения структуры улучшаются механические свойства и повышается их жаростойкость. В связи с тем что механизм электрохимической коррозии алюминиевых сплавов в нейтральной среде электролита NaCl носит анодный характер, необходимо определить параметры данного процесса. В литературе сообщается о положительном влиянии щелочноземельных метал-

лов на коррозионную устойчивость алюминиевого сплава АЖ5К10 [9–13].

Цель настоящей работы состоит в исследовании влияния добавок висмута на коррозионно-электрохимическое поведение алюминиевого сплава АЖ5К10 на основе низкосортного алюминия в среде электролита NaCl. Для достижения поставленной цели необходимо определять основные электрохимические параметры и скорость коррозии алюминиевого сплава АЖ5К10, содержащего висмут.

### Материалы и методы исследования

Сплавы для коррозионно-электрохимических исследований, получали в шахтной печи сопротивления типа СШОЛ при температуре 850 °С с добавлением висмута к сплаву АЖ5К10. Химический состав полученных сплавов контролировался квантометрическим методом в Центральной заводской лаборатории ГУП «Таджикская алюминиевая компания» на предмет содержания железа и кремния.

Из полученных сплавов отливали в графитовую изложницу стержни диаметром 8 мм и длиной 140 мм. Нерабочая часть образцов изолировалась смолой (смесь 50 % канифоли и 50 % парафина). Рабочей поверхностью служил торец электрода. Перед погружением образца в рабочий раствор его торцевую часть зачищали наждачной бумагой, полировали, обезжиривали, тщательно промывали спиртом и затем погружали в раствор NaCl. Температура раствора в ячейке поддерживалась постоянной 20 °С с помощью термостата МЛШ-8.

Для изучения электрохимических свойств сплавов применяли потенциостатический метод исследования, подробно описанный в работах [14–21]. Электрохимические испытания образцов проводили потенциостатическим методом в потенциодинамическом режиме на потенциостате ПИ-50-1.1 со скоростью развертки потенциала 2 мВ/с, в среде электролита NaCl. Электродом сравнения служил хлорид-серебряный, вспомогательным – платиновый.

В качестве примера на рис. 1 представлена полная поляризационная диаграмма для исходного сплава АЖ5К10 в среде электролита – 3,0%-ного NaCl. Образцы потенциодинамически поляризовали в положительном направлении от потенциала, установившегося при погружении, до резкого возрастания тока в результате питтингообразования (рис. 1, кривая I). Затем образцы поляризовали в обратном направлении (рис. 1, кривая II) и по пересечению кривых I и II определяли величину потенциала репассивации. Далее шли в катодную область до значения потенциала –1,2 В для удаления оксидных пленок с поверхности электрода (рис. 1, кривая III) в результате подщелачивания

при электродной поверхности. Наконец, образцы поляризовали вновь в положительном направлении (рис. 1, кривая IV), и из анодных кривых определяли основные электрохимические параметры процесса анодной коррозии сплавов.

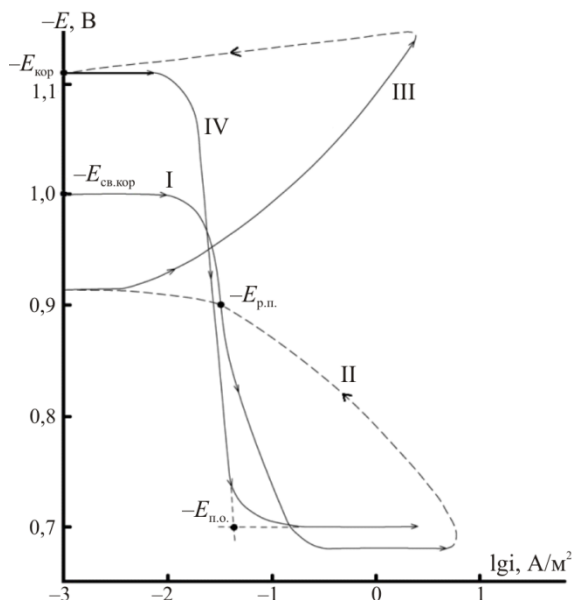


Рис. 1. Полная поляризационная (2 мВ/с) кривая алюминиевого сплава АЖ5К10, в среде электролита 3,0%-ного NaCl

На полученных таким образом поляризационных кривых определяли основные электрохимические характеристики сплавов: потенциал питтингообразования ( $E_{п.о.}$ ), потенциал и ток коррозии ( $E_{кор.}$  и  $i_{кор.}$ ). Потенциал репассивации ( $E_{р.п.}$ ) определялся графически как первый изгиб на обратном ходе анодной кривой или как точка пересечения прямого и обратного хода. Расчет тока коррозии как основной электрохимической характеристики процесса коррозии проводили по катодной кривой с учетом тафеловской наклонной  $v_k = 0,12$  В, поскольку в нейтральных средах процесс питтинговой коррозии алюминия и его сплавов контролируется катодной реакцией ионизации кислорода. Скорость коррозии, в свою очередь, является функцией тока коррозии, находимой по формуле:

$$K = i_{кор.} \cdot \kappa,$$

где  $\kappa = 0,335$  г/А·ч – электрохимический эквивалент алюминия [22; 23].

### Результаты и их обсуждение

Результаты коррозионно-электрохимических исследований алюминиевого сплава АЖ5К10 с висмутом в среде электролита NaCl представлены на рис. 2–6 и в таблице.

Коррозионно-электрохимические характеристики  
алюминиевого сплава АЖ5К10 с висмутом в среде электролита NaCl

Среда NaCl, масс. %	Содержание висмута в сплаве, масс. %	Электрохимические потенциалы, В (х.с.э.)				Скорость коррозии	
		$-E_{св.кор.}$	$-E_{кор.}$	$-E_{пл.о.}$	$-E_{пл.}$	$i_{кор.} \cdot 10^2, \text{А/м}^2$	$K \cdot 10^3, \text{г/м}^2 \cdot \text{ч}$
0,03	–	0,750	0,993	0,644	0,737	3,7	12,39
	0,01	0,518	0,915	0,519	0,723	3,5	11,72
	0,1	0,474	0,899	0,499	0,704	2,9	9,71
	0,5	0,469	0,887	0,489	0,694	2,7	9,04
	1,0	0,459	0,869	0,469	0,674	2,4	8,04
0,3	–	0,950	1,060	0,660	0,780	4,6	15,42
	0,01	0,714	0,964	0,548	0,768	4,1	13,73
	0,1	0,674	0,938	0,518	0,728	3,5	11,72
	0,5	0,664	0,924	0,498	0,713	3,2	10,72
	1,0	0,638	0,908	0,498	0,698	3,0	10,05
3,0	–	1,000	1,110	0,700	0,900	5,8	19,43
	0,01	0,824	0,988	0,568	0,802	5,4	18,09
	0,1	0,749	0,967	0,558	0,778	4,7	15,74
	0,5	0,710	0,958	0,548	0,758	4,4	14,74
	1,0	0,702	0,942	0,533	0,758	4,0	13,40

Исследования показывают, что добавки висмута в пределах 0,01–1,0 % способствуют смещению потенциала свободной коррозии в положительную область во всех трех исследованных средах (рис. 2). При этом потенциалы питингообразования и репассивации также смещаются в положительную область значений. Добавки висмута до 1,0 масс.% снижают скорость коррозии исходного сплава в 1,5–2 раза.

Стабилизация потенциала свободной коррозии наблюдается в течение 20–30 мин от начала погружения электрода в электролит. Сплав АЖ5К10, содержащий 0,5–1,0 масс.% висмута характеризуется более положительным значением потенциала свободной коррозии (рис. 2).

В таблице представлены коррозионно-электрохимические характеристики сплава АЖ5К10 в среде электролита NaCl различной концентрации. Как видно с ростом содержания висмута в исходном сплаве АЖ5К10 и уменьшением концентрации хлорид-иона, потенциалы коррозии, питингообразования и репассивации смещаются в положительную область значений. Это сопровождается уменьшением скорости коррозии исходного сплава почти в 2 раза.

Зависимость скорости коррозии алюминиевого сплава АЖ5К10 от содержания висмута в среде электролита NaCl представлена на рис. 3, 4. Скорость коррозии и плотность тока коррозии имеют минимальное значение при легировании исходного сплава АЖ5К10 1,0 масс.% висмутом (1,5–2 раза меньше по сравнению с исходным сплавом).

Следовательно, указанный состав сплавов является оптимальным в коррозионном отношении. Увеличение концентрации хлорид-иона способствует росту скорости коррозии сплавов (рис. 4). При этом электрохимические потенциалы смещаются в отрицательную область. С ростом концентрации висмута

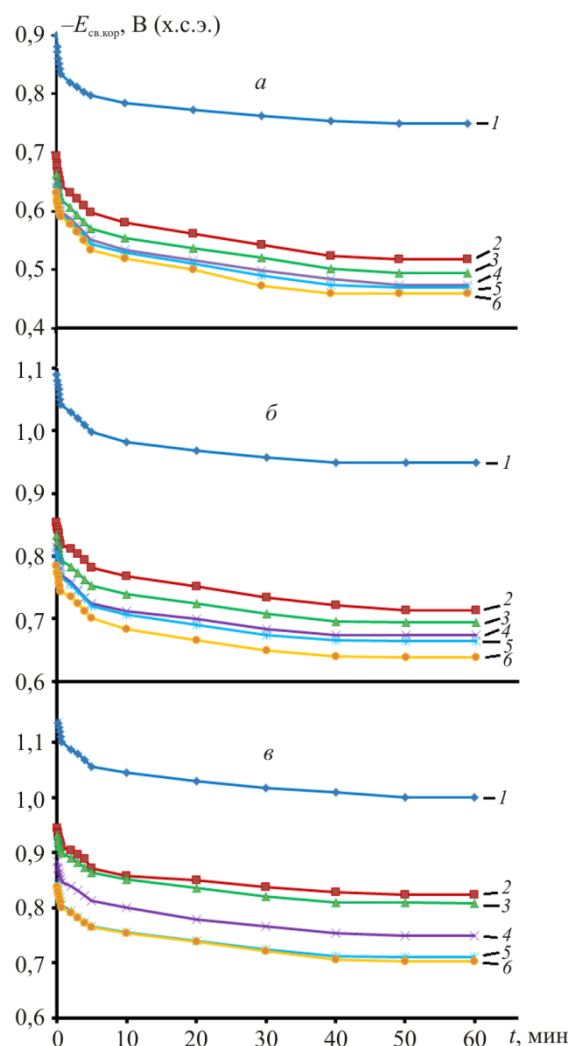


Рис. 2. Временная зависимость потенциала (х.с.э.) свободной коррозии ( $-E_{св.кор.}$ , В) сплава АЖ5К10 (1), содержащего висмут, масс. %: 0,01 (2); 0,05 (3); 0,1 (4); 0,5 (5); 1,0 (6), в среде электролита 0,03 % (а); 0,3 % (б) и 3%-ного (в) NaCl

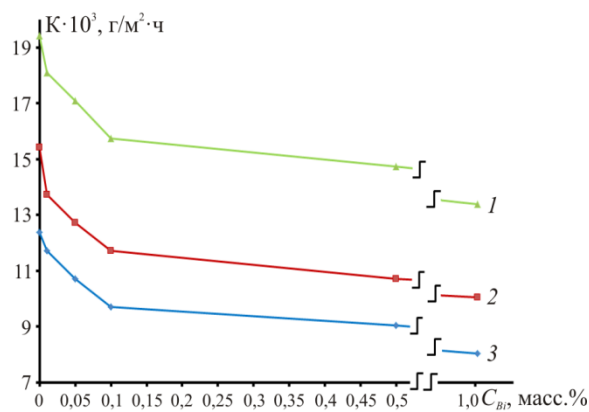


Рис. 3. Зависимость скорости коррозии алюминиевого сплава АЖ5К10 от концентрации висмута в среде электролита 0,03 % (3); 0,3 % (2) и 3,0%-ного (1) NaCl

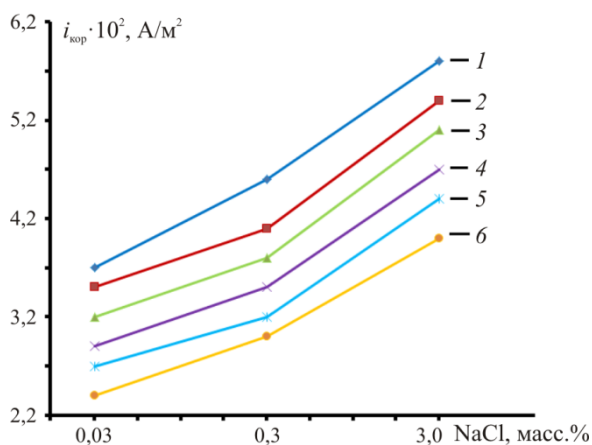


Рис. 4. Зависимость плотности тока коррозии алюминиевого сплава АЖ5К10 (1), содержащего висмут, масс. %: 0,01 (2); 0,05 (3); 0,1 (4); 0,5 (5); 1,0 (6) от концентрации NaCl

анодные кривые легированных сплавов смешаются в положительную область, что сопровождается сдвигом потенциалов свободной коррозии ( $E_{св.кор.}$ ), питтингообразования ( $E_{п.о.}$ ) и репассивации ( $E_{рп.}$ ) в область положительных значений (таблица).

### Выводы

Применение алюминиевых сплавов как конструкционных материалов во многом обусловлено их стойкостью против коррозии и как анодных материалов с отрицательным рабочим потенциалом по отношению к железу и его сплавам.

Сплавы алюминия относятся к материалам с большой химической активностью, которые легко вступают в соединение 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 путем химического или анодного оксидирования до 5 или 50 мкм соответственно.

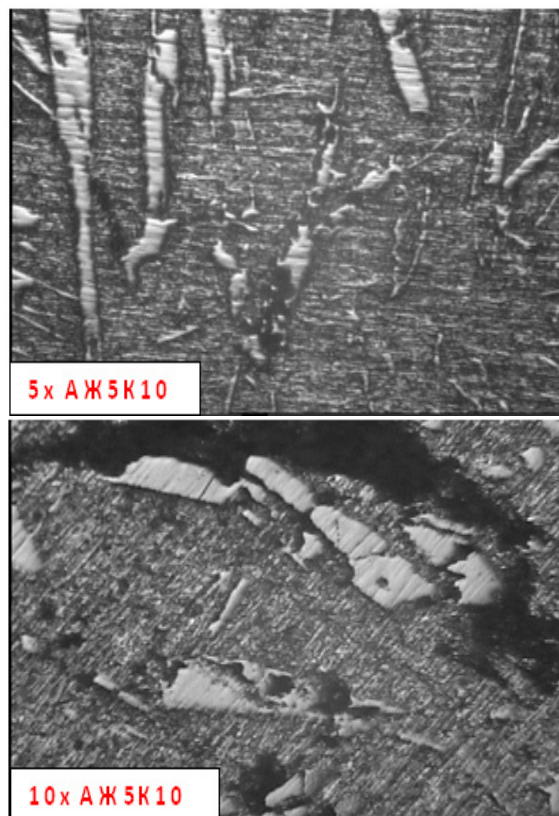


Рис. 5. Микроструктуры (ув.  $\times 10$ ) алюминиевого сплава АЖ5К10

Коррозионная стойкость алюминия и его сплавов в различных агрессивных средах во многом зависит от стойкости в этих средах оксидной пленки, а также от химического состава сплава, вида термической обработки поверхности детали. Известно, что на коррозионную стойкость алюминиевых сплавов отрицательно влияют добавки железа, никеля, олова, свинца и других примесей [24].

Коррозионная стойкость таких сплавов определяется не только химическим составом, но и характером кристаллизации первичных фаз, т.е. формой их выделения (рис. 5). Как известно, модификацией (измельчением) двойной и тройной эвтектик в структуре сплава можно значительно изменить как механические свойства, так и коррозионную стойкость. Улучшение коррозионной стойкости исходного сплава АЖ5К10 объясняется модифицирующим действием на микроструктуру двойных эвтектик ( $\alpha - Al+Si$ ), ( $\alpha - Al+Al_3Fe$ ), а также тройной эвтектики ( $\alpha - Al+SiFeSiAl_5$ ).

Повышение качества алюминиевых протекторов неразрывно связано с разработкой новых марок литейных проекторных сплавов и прогрессивных технологических процессов плавки и литья, обеспечивающих повышение технико-экономических показателей производства и применение литых протекторов. Качество протекторов

зависит также от химического состава, структуры литого металла и так называемых рабочих потенциалов протектора. Как видно из таблицы, потенциал коррозии сплавов составляет  $-0,993 \div -1,110$  В, что  $2 \div 2,5$  раза меньше, чем у железа. Разница потенциала между стальной конструкцией и протектора в нашем случае составляет  $0,550 \div 0,600$  В, что обеспечивает высокий уровень коррозионной стойкости конструкции от коррозии [24; 25].

### Список литературы

1. Дорошенко В.В. Технологичность многокомпонентных алюминиево-кальциевых сплавов при литье и обработке давлением: дис. ... кан. техн. наук. – М., 2019. – 174 с.
2. Алиева С.Г., Альтман М.Б., Амбарцумян С.М. Промышленные алюминиевые сплавы: справочник. – М.: Металлургия, 1984. – 528 с.
3. Kaufman J.G., Rooy E.L. Aluminum alloy castings: properties, processes, and applications. – Materials Park: ASM International, 2004. – 340 p.
4. Zolotarevsky V.S., Belov N.A., Glazoff M.V. Casting aluminum alloys. – Elsevier Science, 2007. – 530 p.
5. Белов Н.А. Фазовый состав промышленных и перспективных алюминиевых сплавов. – М.: МИСиС, 2010. – 511 с.
6. Taylor J.A., The effect of Iron in Al-Si Casting Alloys // 35th Australian Foundry Institute National Conference. – Adelaide, Australia, 2004. – P. 148–157.
7. Belov N.A., Aksenov A.A., Iron in Aluminium Alloys. Impurity and Alloying Element. – London and New York, 2002. – P. 3–7.
8. Golovko O., Mamuzić I., Grydino O. Method for pocket die design on the basis of numerical investigations of aluminium extrusion process // Metalurgija. – 2006. – No. 3. – P. 155–161.
9. Влияние литья на коррозионно-электрохимическое поведение алюминиевого сплава АЖ5К10, в среде электролита NaCl / Л.А. Бокиев, И.Н. Ганиев, Н.И. Ганиева, А.Х. Хакимов, У.Ш. Якубов // Вестник Тверского государственного университета. Серия: Химия. – 2019. – № 3 (37). – С. 79–89.
10. О коррозионном потенциале сплава АЖ5К10, модифицированного щелочноземельными металлами, в среде электролита NaCl / У.Ш. Якубов, И.Н. Ганиев, М.М. Сангов, Н.И. Ганиева // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2018. – Т. 16, № 3. – С. 109–119.
11. Влияние добавок кальция на коррозионно-электрохимическое поведение сплава АЖ5К10 в водных растворах NaCl / У.Ш. Якубов, И.Н. Ганиев, М.М. Сангов, Р.Н. Амини // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия. – 2018. – Т. 18, № 3. – С. 5–15.
12. Якубов У.Ш., Ганиев И.Н., Сангов М.М. Электрохимическая коррозия сплава АЖ5К10, модифицированного барием, в среде электролита NaCl // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). – 2018. – № 43 (69). – С. 21–25.
13. Анодное поведение сплава АЖ5К10, модифицированного стронцием, в среде электролита NaCl / И.Н. Ганиев, У.Ш. Якубов, М.М. Сангов, А.Х. Хакимов // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2017. – № 4 (22). – С. 57–62.
14. 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.
15. Анодное поведение сплавов системы Mg-Се в среде электролита NaCl / И.Н. Ганиев, Э.С. Додхоев, А.Г. Сафаров, У.Ш. Якубов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2021. – Т. 23, № 1. – С. 13–19.
16. Потенциал свободной коррозии сплавов системы Mg-Се в среде электролита NaCl / И.Н. Ганиев, Э.С. Додхоев, А.Г. Сафаров, У.Ш. Якубов // Химия. Экология. Урбанистика. – 2021. – Т. 2021–1. – С. 363–367.
17. Потенциодинамическое исследование сплавов свинца с теллуром, в среде электролита / С.У. Худойбердизода, И.Н. Ганиев, Н.М. Муллоева, Д.Х. Джайлоев, У.Ш. Якубов // Вестник Таджикского национального университета. Серия: Естественные науки. – 2020. – № 2. – С. 238–245.
18. Потенциодинамическое исследование свинцового сплава ССу3, легированного медью, в среде электролита на NaCl / С.У. Худойбердизода, И.Н. Ганиев, Н.М. Муллоева, Б.Б. Эшов, Д.Х. Джайлоев, У.Ш. Якубов // Вестник Таджикского национального университета. Серия: Естественные науки. – 2019. – № 1. – С. 206–213.
19. Повышение антикоррозионных свойств высококачественного цинка, легированием алюминием / И.Н. Ганиев, С.С. Содикова, С.Дж. Алихонова, Р.Х. Саидзода // Материаловедение. – 2021. – № 5. – С. 3–6.
20. Коррозионно-электрохимическое поведение цинкового сплава ЦАМ4-1, легированного галлия, в среде электролита NaCl / И.Н. Ганиев, П.Н. Абдухоликова, А.Э. Бердиев, С.Дж. Алихонова // Вестник Казанского технологического университета. – 2020. – Т. 23, № 11. – С. 44–48.
21. Влияние добавок меди на коррозионно-электрохимическое поведение высококачественного цинка, в среде электролита NaCl / И.Н. Ганиев, С.С. Содикова, Р.Х. Саидзода, С.Дж. Алихонова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия. – 2020. – Т. 20, № 4. – С. 14–22.
22. Анодное поведение сплава Al+2.18%Fe, легированного стронцием в среде электролита NaCl / Дж.Х. Джайлоев, И.Н. Ганиев, И.Т. Амонов, У.Ш. Якубов // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2019. – № 1 (27). – С. 42–46.
23. Влияние добавок свинца на анодное поведение проводникового алюминиевого сплава E-AlMgSi («алдрей») в среде электролита NaCl / И.Н. Ганиев, А.П. Абулаков, Дж.Х. Джайлоев, Н.И. Ганиева, У.Ш. Якубов // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1: Естественные и технические науки. – 2020. – № 2. – С. 109–113.
24. Постников Н.С. Коррозионно-стойкие алюминиевые сплавы. – М.: Металлургия, 1976. – 301 с.



25. Строганов Г.Б., Ротенберг В.А., Гершман Г.Б. Сплавы алюминия с кремнием. – М.: Металлургия, 1977. – 272 с.

## References

1. Doroshenko V.V. Tekhnologichnost' mnogokomponentnykh aliuminievo-kal'tsievyykh splavov pri lit'e i obrabotke davleniem [Manufacturability of multicomponent aluminum-calcium alloys during casting and forming]. PhD theses. Moscow, 2019, 174 p.

2. Alieva S.G., Al'tman M.B., Ambartsumian S.M. Promyshlennyye aliuminievye splavy: spravochnik [Industrial aluminum alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1984, 528 p.

3. Kaufman J.G., Rooy E.L. Aluminum alloy castings: properties, processes, and applications. *Materials Park: ASM International*, 2004, 340 p.

4. Zolotarevsky V.S., Belov N.A., Glazoff M.V. Casting aluminum alloys. *Elsevier Science*, 2007, 530 p.

5. Belov N.A. Fazovyi sostav promyshlennykh i perspektivnykh aliuminievykh splavov [Phase composition of industrial and promising aluminum alloys]. Moscow: MISiS, 2010, 511p.

6. Taylor J.A., The effect of Iron in Al-Si Casting Alloys. *35th Australian Foundry Institute National Conference, Adelaide, Australia*, 2004, pp. 148–157.

7. Belov N.A., Aksenov A.A., Iron in Aluminium Alloys. *Impurity and Alloying Element*. London and New York, 2002, pp. 3–7.

8. Golovko O., Mamuzić I., Grydino O. Method for pocket die design on the basis of numerical investigations of aluminium extrusion process. *Metallurgija*, 2006, no. 3, pp. 155–161.

9. Bokiev L.A., Ganiev I.N., Ganieva N.I., Khakimov A.Kh., Iakubov U.Sh. Vliianie litiia na korrozionno-elektrokhimi-cheskoe povedenie aliuminieвого сплава AZh5K10, v srede elektrolita NaCl [The influence of lithium on the corrosion-electrochemical behavior of the AlFe5Si10 aluminum alloy in the NaCl electrolyte environment]. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Khimiia*, 2019, no. 3 (37), pp. 79–89.

10. Iakubov U.Sh., Ganiev I.N., Sangov M.M., Ganieva N.I. O korrozionnom potentsiale сплава AZh5K10, modifitsirovannogo shchelochnozemel'nymi metallami, v srede elektrolita NaCl [On the corrosion potential of the AlFe5Si10 alloy modified with alkaline-earth metals in an electrolyte environment of NaCl]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova*, 2018, vol. 16, no. 3, pp. 109–119.

11. Iakubov U.Sh., Ganiev I.N., Sangov M.M., Amini R.N. Vliianie dobavok kal'tsiia na korrozionno-elektrokhimicheskoe povedenie сплава AZh5K10 v vodnykh rastvorakh NaCl [The influence of calcium additions on the corrosion-electrochemical behavior of the AlFe5Si10 alloy in aqueous solutions of NaCl]. *Vestnik Iuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Metallurgiya*, 2018, vol. 18, no. 3, pp. 5–15.

12. Iakubov U.Sh., Ganiev I.N., Sangov M.M. Elektrokhimicheskaya korroziiia сплава AZh5K10, modifitsirovannogo bariem, v srede elektrolita NaCl [Electrochemical corrosion of barium modified AlFe5Si10 alloy in NaCl electro-

lyte environment]. *Izvestiia Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo instituta (tekhnicheskogo universiteta)*, 2018, no. 43 (69), pp. 21–25.

13. Ganiev I.N., Iakubov U.Sh., Sangov M.M., Khakimov A.Kh. Anodnoe povedenie сплава AZh5K10, modifitsirovannogo strontsiem, v srede elektrolita NaCl [Anodic behavior of the AZh5K10 alloy modified with strontium in the environment of the NaCl electrolyte]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo industrial'nogo universiteta*, 2017, no. 4 (22), pp. 57–62.

14. Ganiev I.N., Dodkhoev E.S., Iakubov U.Sh. Korrozionno-elektrokhimicheskoe povedenie сплавов системы Mg – La v srede elektrolita NaCl [Corrosion-electrochemical behavior of alloys of the Mg - La system in the environment of an electrolyte NaCl]. *Vestnik Kazan'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. A.N. Tupoleva*, 2021, vol. 77, no. 1, pp. 19–23.

15. Anodnoe povedenie сплавов системы Mg-Ce v srede elektrolita NaCl [Anodic behavior of alloys of the Mg-Ce system in an electrolyte NaCl environment]. I.N. Ganiev, E.S. Dodkhoev, A.G. Safarov, U.Sh. Iakubov. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*, 2021, vol. 23, no. 1, pp. 13–19.

16. Ganiev I.N., Dodkhoev E.S., Safarov A.G., Iakubov U.Sh. Potentsial svobodnoi korrozii сплавов системы Mg-Ce v srede elektrolita NaCl [Free corrosion potential of Mg-Ce alloys in NaCl electrolyte medium]. *Khimiia. Ekologiya. Urbanistika*, 2021, vol. 2021–1, pp. 363–367.

17. Khudoiberdizoda S.U., Ganiev I.N., Mulloeva N.M., Dzhailoev D.Kh., Iakubov U.Sh. Potentsiodinamicheskoe issledovanie сплавов свинца s tellurom, v srede elektrolita [Potential of free corrosion of alloys of the Mg-Ce system in an electrolyte NaCl environment]. *Vestnik Tadzhikskogo natsional'nogo universiteta. Seriya: Estestvennye nauki*, 2020, no. 2, pp. 238–245.

18. Khudoiberdizoda S.U., Ganiev I.N., Mulloeva N.M., Eshov B.B., Dzhailoev D.Kh., Iakubov U.Sh. Potentsiodinamicheskoe issledovanie svintsovogo сплава SSu3, legirovannogo med'iu, v srede elektrolita na NaCl [Potentiodynamic study of a lead alloy CCy3 alloyed with copper in an electrolyte medium on NaCl]. *Vestnik Tadzhikskogo natsional'nogo universiteta. Seriya: Estestvennye nauki*, 2019, no. 1, pp. 206–213.

19. Ganiev I.N., Sodikova S.S., Alikhonova S.Dzh., Saidzoda R.Kh. Povyshenie antikorroziionnykh svoystv vysokochistogo tsinka, legirovaniem aliuminiem [Increase of anticorrosion properties of high-purity zinc by alloying with aluminum]. *Materialovedenie*, 2021, no. 5, pp. 3–6.

20. Ganiev I.N., Abdukholikova P.N., Berdiev A.E., Alikhonova S.Dzh. Korrozionno-elektrokhimicheskoe povedenie tsinkovogo сплава TsAM4-1, legirovannogo galliia, v srede elektrolita NaCl [Corrosion-electrochemical behavior of zinc alloy TsAM4-1 doped with gallium in an electrolyte NaCl environment]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2020, vol. 23, no. 11, pp. 44–48.

21. Ganiev I.N., Sodikova S.S., Saidzoda R.Kh., Alikhonova S.Dzh. Vliianie dobavok medi na korrozionno-elektrokhimicheskoe povedenie vysokochistogo tsinka, v srede elektrolita NaCl [The influence of copper additions on the corrosion-electrochemical behavior of high-purity

zinc in an electrolyte NaCl environment]. *Vestnik Iuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Metallurgiya*, 2020, vol. 20, no. 4, pp. 14–22.

22. Dzhailoev Dzh.Kh., Ganiev I.N., Amonov I.T., Iakubov U.Sh. Anodnoe povedenie splava Al+2.18%Fe, legirovannogo strontsiem v srede elektrolita NaCl [Anodic behavior of the Al + 2.18% Fe alloy doped with strontium in the NaCl electrolyte environment]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo industrial'nogo universiteta*, 2019, no. 1 (27), pp. 42–46.

23. Ganiev I.N., Abulakov A.P., Dzhailoev Dzh.Kh., Ganieva N.I., Iakubov U.Sh. Vliianie dobavok svintsy na anodnoe povedenie provodnikovogo aliuminievologo splava E-AlMgSi («aldrey») v srede elektrolita NaCl [Influence of lead additions on the anodic behavior of the conductive aluminum alloy E-AlMgSi ("aldrey") in the NaCl electrolyte environment]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta tekhnologii i dizaina. Seriya 1: Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 2020, no. 2, pp. 109–113.

24. Postnikov N.S. Korroziionnostoikie aliuminievye splavy [Corrosion-resistant aluminum alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1976, 301 p.

25. Stroganov G.B., Rotenberg V.A., Gershman G.B. Splavy aliuminiia s kremniem [Alloys of aluminum with silicon]. Moscow: Metallurgiya, 1977, 272 p.

Поступила: 28.10.2021

Одобрена: 21.02.2022

Принята к публикации: 22.02.2022

#### Сведения об авторах

**Ганиев Изатулло Наврузович** (Душанбе, Таджикистан) – доктор химических наук, профессор, академик Института химии имени В.И. Никитина Национальной академии наук Таджикистана, заведующий лабораторией «Коррозионностойкие материалы», лауреат государственной премии Республики Таджикистан в области науки и техники им. А. Сино (Таджикистан, 734063, Душанбе, пр-т Айни, 299/2, e-mail: ganievizatullo48@gmail.com).

**Нуров Нурулло Раджабович** (Душанбе, Таджикистан) – старший преподаватель кафедры «Электроэнергетика» Технического колледжа Таджикского технического университета имени М.С. Осими (Таджикистан, 734042, Душанбе, пр-т Айни, 41, e-mail: amirsho71@mail.ru).

**Якубов Умарали Шералиевич** (Душанбе, Таджикистан) – старший научный сотрудник лабораторией

«Коррозионностойкие материалы» Института химии имени В.И. Никитина Национальной академии наук Таджикистана (Таджикистан, 734063, Душанбе, пр-т Айни, 299/2, e-mail: yakubovumarali@gmail.com).

**Ботуров Кодир** (Душанбе, Таджикистан) – кандидат технических наук, руководитель «Центра исследования и использования возобновляемых источников энергии (ЦИИВИЭ)» Физико-технического института имени С.У. Умарова Национальной академии наук Таджикистана (Таджикистан, 734063, Душанбе, пр-т Айни, 299/1, e-mail: amirsho71@mail.ru).

#### About the authors

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

**Nurullo R. Nurov** (Dushanbe, Tajikistan) – Senior Lecturer at the Department of Electricity Engineering College of the Tajik Technical University named after M.S. Osimi (734042, Dushanbe, Aini st., 41, e-mail: amirsho71@mail.ru);

**Umarali Sh. Yakubov** (Dushanbe, Tajikistan) – (PhD) Doctor, Senior Researcher of the Laboratory of Corrosion-Resistant Materials of the Institute of Chemistry named after V.I. Nikitin of the National Academy of Sciences of Tajikistan (734063, Dushanbe, Aini ave., 299/2, e-mail: yakubovumarali@gmail.com);

**Boturov Kodir** (Dushanbe, Tajikistan) – Candidate of Technical Sciences, Head of the Center for Research and Use of Renewable Energy Sources of the Physico-Technical Institute named after S.U. Umarov of the National Academy of Sciences of Tajikistan (734063, Dushanbe, Ayni ave., 299/1, e-mail: boturov.kodir@mail.ru).

**Финансирование.** Исследование не имело спонсорской поддержки.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Вклад авторов** равноценен.