

УДК 620.193+669.715

## Коррозионно–электрохимическое поведение алюминиевого проводникового сплава E–AlMgSi (алдрей) с оловом в среде электролита NaCl

© 2019 г. И. Н. Ганиев<sup>1,§</sup>, А. П. Абулаков<sup>2</sup>, Дж. Х. Джайлоев<sup>3</sup>,  
Ф. А. Алиев<sup>2</sup>, А. Р. Рашидов<sup>4</sup>

<sup>1</sup> *Таджикский технический университет имени академика М. С. Осими,  
ул. Раджабовых, д. 10, Душанбе, 734042, Таджикистан*

<sup>2</sup> *Дангаринский государственный университет, ул. Маркази, д. 25, Дангара, 735320, Таджикистан*

<sup>3</sup> *Институт химии им. В. И. Никитина АН Республики Таджикистан,  
ул. Садриддина Айни, д. 299/2, Душанбе, 734063, Таджикистан*

<sup>4</sup> *Институт энергетики Таджикистана,  
ул. Носири Хусрав, Хатлонская область, Бохтариен, 735162, Таджикистан*

**Аннотация.** Одним из перспективных направлений использования алюминия является электротехническая промышленность. Экономическая целесообразность применения алюминия в качестве проводникового материала объясняется благоприятным соотношением его стоимости и стоимости меди. Кроме того следует учесть и тот фактор, что стоимость алюминия в течение многих лет практически не меняется.

При использовании проводниковых алюминиевых сплавов для изготовления тонкой проволоки, обмоточного провода и т. д. могут возникнуть определенные сложности в связи с их недостаточной прочностью и малым числом перегибов до разрушения. В последние годы разработаны алюминиевые сплавы, которые даже в мягком состоянии обладают прочностными характеристиками, позволяющими использовать их в качестве проводникового материала. Проводниковые алюминиевые сплавы типа E–AlMgSi (алдрей) являются представителями данной группы сплавов и относятся к термоупрочняемым сплавам. Они отличаются высокой прочностью и хорошей пластичностью. Данные сплавы при соответствующей термической обработке приобретают высокую электропроводность. Изготовленные из них провода используются почти исключительно для воздушных линий электропередач.

В работе представлены результаты исследования анодного поведения алюминиевого сплава E–AlMgSi (алдрей) с оловом, в среде электролита 0,03, 0,3 и 3,0%-ного NaCl. Коррозионно–электрохимические исследования сплавов проведены потенциостатическим методом на потенциостате ПИ–50–1.1 при скорости развертки потенциала 2 мВ/с. Показано, что легирование сплава E–AlMgSi (алдрей) оловом повышает его коррозионную устойчивость на 20 %. Основные электрохимические потенциалы сплава E–AlMgSi (алдрей) при легировании оловом смещаются в положительную область значений, а от концентрации хлорида натрия — в отрицательном направлении оси ординат.

**Ключевые слова:** алюминиевый сплав E–AlMgSi (алдрей), олово, потенциостатический метод, электролит NaCl, потенциал свободной коррозии, потенциал коррозии, потенциал питтингообразования, скорость коррозии

### Введение

Алюминий и его сплавы широко применяют в электротехнике в качестве проводника и конструкционного материала. Как проводниковый материал алюминий характеризуется высокой электро- и теплопроводностью (после меди максимальный

уровень среди всех технически применяемых металлов) [1].

Алюминий также отличается малой плотностью, высокой коррозионной стойкостью в атмосферных условиях и стойкостью против воздействия химических веществ. Несмотря на это, сплавы алюминия в определенном состоянии и в жестких условиях

**Ганиев Изатулло Наврузович**<sup>1,§</sup> — академик АН Республики Таджикистан, доктор хим. наук, профессор кафедры «Технология химических производств», e-mail: [ganiev48@mail.ru](mailto:ganiev48@mail.ru); **Абулаков Аслам Пирович**<sup>2</sup> — ассистент кафедры «Сельского строительства, гидротехники и геологии»; **Джайлоев Джамшед Хусейнович**<sup>3</sup> — старший научный сотрудник, e-mail: [husezod85@mail.ru](mailto:husezod85@mail.ru); **Алиев Фирдавс Алиевич**<sup>2</sup> — ассистент кафедры «Сельского строительства, гидротехники и геологии», e-mail: [firdavs.aliev.2016@mail.ru](mailto:firdavs.aliev.2016@mail.ru); **Рашидов Акрам Раджабович**<sup>4</sup> — старший преподаватель кафедры «Автоматизированный электропривод», e-mail: [rashidov0909@mail.ru](mailto:rashidov0909@mail.ru)

§ Автор для переписки.

эксплуатации могут подвергаться опасным видам коррозионных разрушений. Особый интерес представляет коррозия алюминия в растворах, близких к нейтральным ( $6 < \text{pH} < 8$ ). К таким видам коррозии относится коррозия в природных средах, в том числе в морской, озерной и речной воде, питьевой воде и атмосферных осадках. В этих условиях при обычных температурах скорость ионов  $\text{H}^+$  или молекул  $\text{H}_2\text{O}$  с выделением водорода пренебрежимо мала [2].

Экономическая целесообразность применения алюминия в качестве проводникового материала объясняется благоприятным соотношением его стоимости и стоимости меди. Кроме того, следует учесть и тот фактор, что стоимость алюминия в течение многих лет практически не меняется [1—4].

При использовании проводниковых алюминиевых сплавов для изготовления тонкой проволоки, например обмоточного провода и т. д., могут возникнуть определенные сложности в связи с их недостаточной прочностью и малым числом перегибов до разрушения.

В последние годы разработаны алюминиевые сплавы, которые даже в мягком состоянии обладают прочностными характеристиками, позволяющими использовать их в качестве проводникового материала [1—3].

Одним из проводниковых алюминиевых сплавов является сплав  $\text{E-AlMgSi}$  (алдрей), который относится к термоупрочняемым сплавам. Он отличается высокой прочностью и хорошей пластичностью. Данный сплав при соответствующей термической обработке приобретает высокую электропроводность. Изготовленные из него провода используются почти исключительно для воздушных линий электропередач [4, 5]. Так как линии электропередачи из алюминия и его сплавов эксплуатируются в открытой атмосфере, вопросы повышения коррозионной стойкости сплавов являются актуальными.

Цель работы — исследование влияния добавок олова на коррозионно-электрохимическое поведение алюминиевого проводникового сплава  $\text{E-AlMgSi}$  (алдрей) со следующим химическим составом: 0,5 % (мас.) Si, 0,5 % (мас.) Mg, остальное — Al.

**Образцы и методы исследования**

Синтез сплавов проводили в шахтной лабораторной печи сопротивления типа СШОЛ при температуре 750—800 °С. В качестве шихты при получении сплава  $\text{E-AlMgSi}$  (алдрей) использовали алюминий марки А6, который дополнительно легировали расчетным количеством кремния и магния. При легировании алюминия кремнием учитывали имеющийся в составе первичного алюминия кремний (0,1 % (мас.)) металлический. Магний, завернутый в алюминиевую фольгу, вводили в расплав алюминия с помощью колокольчика. Металлическое олово вво-

дили в расплав также в завернутом в алюминиевую фольгу виде. Химический анализ полученных сплавов на содержание кремния и магния проводили в Центральной заводской лаборатории ГУП «Таджикская алюминиевая компания». Состав сплавов контролировали взвешиванием шихты и полученных сплавов. При отклонении массы сплавов более, чем на 1—2 % (отн.), синтез сплавов проводили заново. Далее из расплава удаляли шлак и проводили литье образцов для коррозионно-электрохимических исследований в графитовую изложницу. Образцы представляли собой цилиндры диаметром 10 мм и длиной 140 мм.

Исследования проводили в нейтральных растворах, содержащих NaCl различной концентрации, согласно рекомендациям ГОСТ 9.017-74, т. е. в имитате морской воды, с целью определения влияния хлорид-иона на коррозионно-электрохимическое поведение алюминиевого сплава  $\text{E-AlMgSi}$  (алдрей) с оловом.

Исследования проводили с использованием потенциостата ПИ-50-1.1 и самописца ЛКД-4-002. Электродом сравнения служил хлоридсеребряный электрод (ХСЭ), а вспомогательным — платиновый. Скорость развертки потенциала составляла  $2 \text{ мВ} \cdot \text{с}^{-1}$ .

Для электрохимических исследований образцы поляризовали в положительном направлении от потенциала, установившегося при погружении в исследуемый раствор ( $E_{\text{св.кор.}}$  — потенциал свободной коррозии или стационарный), до значения потенциала, при котором происходит резкое возрастание плотности тока (рис. 1, кривая 1). Затем образцы поляризовали в обратном направлении (рис. 1, кривые 2 и 3) до значения потенциала  $-1,3 \text{ В}$ ,

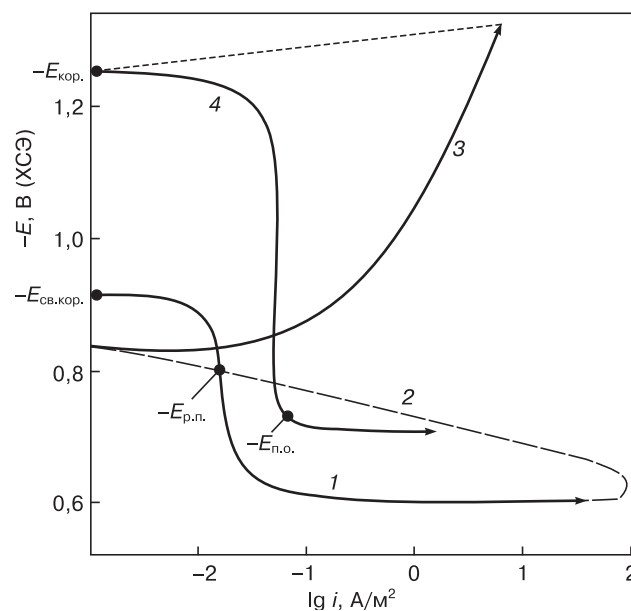


Рис. 1. Полная поляризационная (2 мВ/с) кривая сплава  $\text{E-AlMgSi}$  (алдрей) в среде электролита 3 % NaCl  
 Fig. 1. Full polarization (2 mV/s) curve of the  $\text{E-AlMgSi}$  (aldrey) alloy, in electrolyte medium of 3% NaCl

в результате чего происходило растворение пленки оксида. Наконец, образцы повторно поляризовали в положительном направлении (рис. 1, кривая 4), при этом при переходе от катодного к анодному ходу фиксируется потенциал начала пассивации ( $E_{\text{нп}}$ ).

На полученной таким образом поляризационной кривой определяли основные электрохимические потенциалы сплавов:  $-E_{\text{ст}}$  или  $-E_{\text{св.кор.}}$  — стационарный потенциал или потенциал свободной коррозии;  $-E_{\text{рп}}$  — потенциал репассивации;  $-E_{\text{п.о.}}$  — потенциал питтингообразования;  $-E_{\text{кор.}}$  — потенциал коррозии;  $-i_{\text{кор.}}$  — ток коррозии.

Расчет тока коррозии проводили с учетом тафеловской наклонной  $A = 0,12$  В по катодной кривой, так как процесс питтинговой коррозии алюминия и его сплавов в нейтральных средах зависит от катодной реакции ионизации кислорода. В свою очередь,

скорость коррозии считается функцией тока коррозии и вычисляется по формуле:

$$K = i_{\text{кор.}} k_K,$$

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

Подробно методика снятия поляризационных кривых сплавов представлена в работах [6—15]. Результаты коррозионно-электрохимических исследований сплава E-AlMgSi (алдрей) с оловом в среде электролита NaCl приведены в таблице и на рис. 2—5. На рис. 2 представлена графическая зависимость потенциала свободной коррозии от времени для образцов из сплава E-AlMgSi (алдрей) с оловом в среде электролита NaCl. Из рис. 2 видно, что при погружении сплавов в электролит NaCl происходит смещение потенциала  $-E_{\text{св.кор.}}$  в положительную область.

### Результаты и их обсуждение

Результаты исследований коррозионно-электрохимических свойств сплавов, представленные в таблице, свидетельствуют о том, что добавки олова от 0,05 и до 1,0 % (мас.) к исходному сплаву E-AlMgSi (алдрей) в исследуемых средах сдвигают потенциалы коррозии, репассивации и питтингообразования в область положительных значений.

Как было показано в работе [16], разность между потенциалом питтингообразования и потенциалом свободной коррозии металла (базис питтингостойкости  $\Delta E_{\text{пс.}}$ ) используют как сравнительный критерий его склонности к питтинговой коррозии в данной среде. Если проанализировать полученные экспериментальные результаты, согласно данному показателю, то можно увидеть, что добавки олова практически не влияют на базис питтингостойкости  $\Delta E_{\text{пс.}}$  сплава E-AlMgSi (алдрей).

Анодные ветви поляризационных кривых сплава E-AlMgSi (алдрей) с оловом приведены на рис. 3. Как видно из хода кривых на рис. 3, с повышением содержания третьего компонента (олова) наблюдается смещение в область положительных значений всех электрохимических потенциалов в среде электролита NaCl, что свидетельствует о снижении скорости анодного растворения легированных сплавов. Сдвиг в положительную область электрохимических потенциалов и снижение скорости коррозии сплава E-AlMgSi (алдрей) при легировании его оловом можно объяснить ростом степени гетерогенности структуры сплавов.

На рис. 4 приведены зависимости скорости коррозии сплава E-AlMgSi (алдрей) от содержания олова в среде электролита с различным содержанием NaCl. Добавление олова к сплаву E-AlMgSi (алдрей) уменьшает скорость его коррозии во всех исследованных средах электролита NaCl (см. рис. 4).

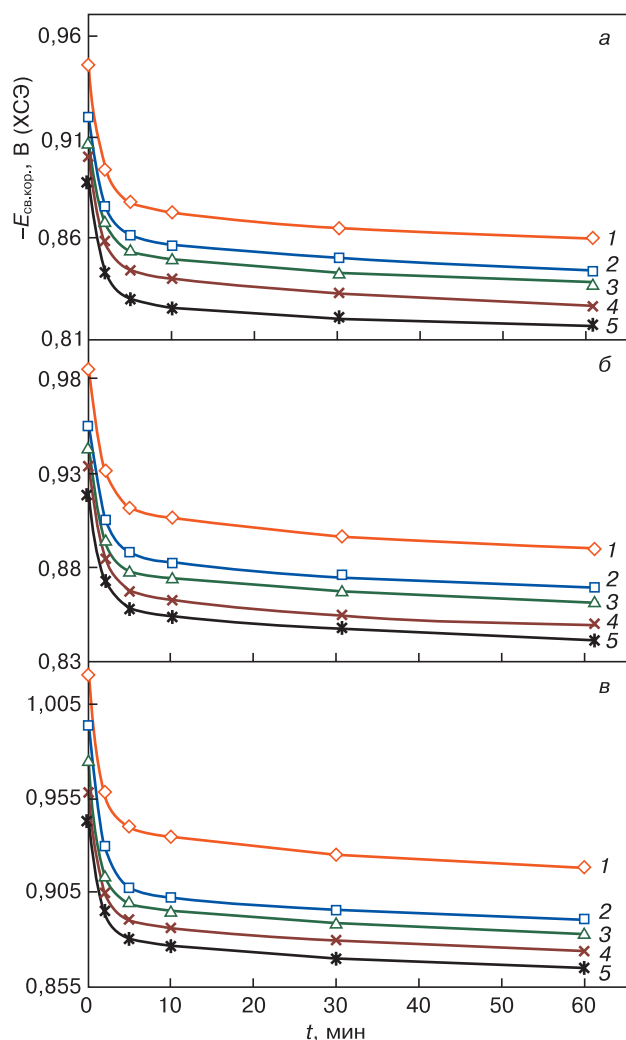


Рис. 2. Временные зависимости потенциала (ХСЭ) свободной коррозии ( $-E_{\text{св.кор.}}$ , В) сплава E-AlMgSi (алдрей) с различным содержанием олова в среде электролита NaCl: а — 0,03%-ный NaCl; б — 0,3%-ный NaCl; в — 3%-ный NaCl; 1 — 0; 2 — 0,01 % (мас.) Sn; 3 — 0,05 % (мас.) Sn; 4 — 0,1 % (мас.) Sn; 5 — 0,5 % (мас.) Sn

Fig. 2. Temporal dependence of the potential (HSE) of free corrosion ( $-E_{\text{free corr.}}$ , V) of the E-AlMgSi alloy (aldrey) (1) containing tin, wt. %: 0.01 (2); 0.05 (3); 0.1 (4); 0.5 (5), in the electrolyte medium 0.03% (a); 0.3% (б) and 3% (в) NaCl

**Коррозионно–электрохимические характеристики сплава E–AlMgSi (алдрей) с оловом в среде электролита NaCl [Electrochemical corrosion properties of tin containing E–AlMgSi (aldrey) aluminum alloy in NaCl electrolyte]**

| Среда NaCl, % (мас.) | Содержание олова в сплаве, % (мас.) | Электрохимические потенциалы, В (ХСЭ) |             |             |            |                  | Скорость коррозии                       |   |
|----------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|-------------|-------------|------------|------------------|---|---|
|                      |                                     | $-E_{св.кор.}$                        | $-E_{кор.}$ | $-E_{п.о.}$ | $-E_{рп.}$ | $\Delta E_{пс.}$ | $i_{кор.} \cdot 10^{-2}, \text{ А/м}^2$ | $K \cdot 10^{-3}, \text{ г/(м}^2 \cdot \text{ч)}$ |
| 0,03                 | —                                   | 0,860                                 | 1,100       | 0,600       | 0,720      | 260              | 0,049                                   | 16,41   |
|                      | 0,05                                | 0,836                                 | 1,077       | 0,589       | 0,707      | 247              | 0,045                                   | 15,07   |
|                      | 0,1                                 | 0,829                                 | 1,058       | 0,578       | 0,701      | 251              | 0,042                                   | 14,07   |
|                      | 0,5                                 | 0,820                                 | 1,047       | 0,570       | 0,698      | 250              | 0,040                                   | 13,40   |
|                      | 1,0                                 | 0,812                                 | 1,038       | 0,557       | 0,698      | 255              | 0,038                                   | 12,73   |
| 0,3                  | —                                   | 0,890                                 | 1,180       | 0,680       | 0,768      | 210              | 0,066                                   | 22,11   |
|                      | 0,05                                | 0,866                                 | 1,158       | 0,654       | 0,750      | 212              | 0,063                                   | 21,10   |
|                      | 0,1                                 | 0,855                                 | 1,140       | 0,640       | 0,750      | 215              | 0,060                                   | 20,10   |
|                      | 0,5                                 | 0,846                                 | 1,127       | 0,632       | 0,745      | 214              | 0,057                                   | 19,09   |
|                      | 1,0                                 | 0,837                                 | 1,110       | 0,626       | 0,742      | 211              | 0,054                                   | 18,09   |
| 3,0                  | —                                   | 0,919                                 | 1,240       | 0,735       | 0,800      | 184              | 0,082                                   | 27,47   |
|                      | 0,05                                | 0,890                                 | 1,218       | 0,712       | 0,774      | 178              | 0,078                                   | 26,13   |
|                      | 0,1                                 | 0,883                                 | 1,210       | 0,704       | 0,770      | 179              | 0,075                                   | 25,12   |
|                      | 0,5                                 | 0,874                                 | 1,202       | 0,698       | 0,765      | 176              | 0,073                                   | 24,45   |
|                      | 1,0                                 | 0,865                                 | 1,194       | 0,690       | 0,758      | 175              | 0,071                                   | 23,78   |

При этом рост концентрации электролита NaCl (хлорид–иона) способствует увеличению скорости коррозии сплавов (рис. 5). Скорость коррозии и плотность тока коррозии сплава E–AlMgSi (алдрей) имеют минимальное значение при концентрации 1,0 % (мас.) олова. Следовательно, указанный состав

сплавов является оптимальным в коррозионном отношении.

Согласно данным работы [17], пассивирующий оксид, образующийся на алюминии в нейтральных средах, имеет низкую электронную проводимость. Он тормозит практически полностью не только

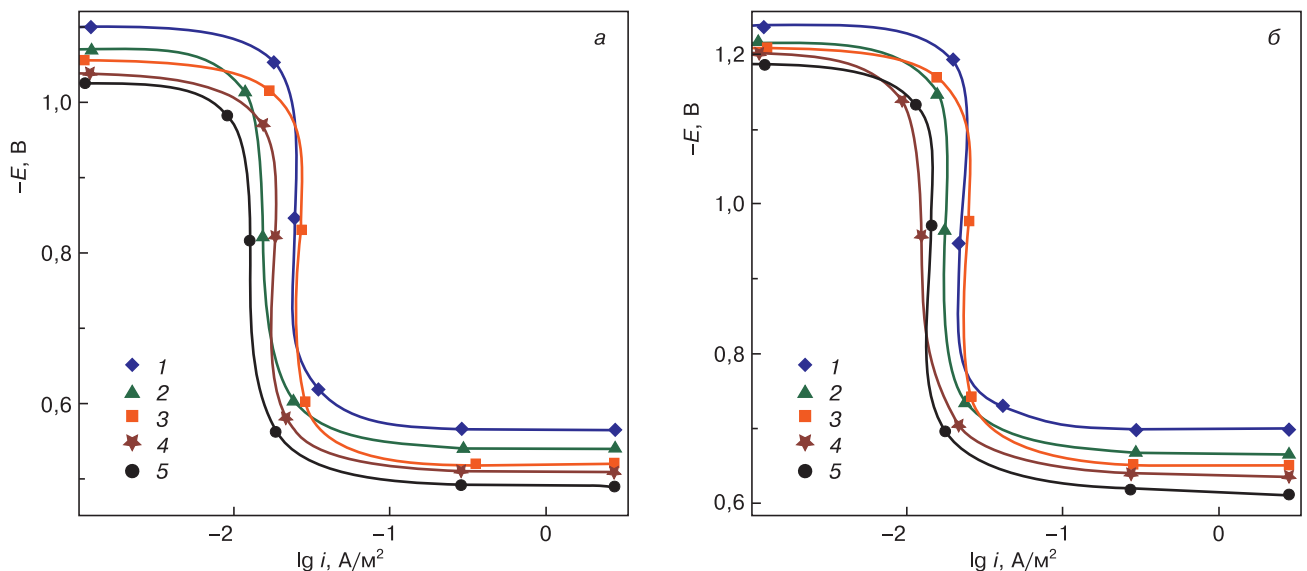


Рис. 3. Анодные поляризационные (2 мВ/с) кривые сплава E–AlMgSi (алдрей) с различным содержанием олова в среде электролита NaCl: а — 0,03%-ный NaCl; б — 3%-ный NaCl; 1 — 0; 2 — 0,01 % (мас.) Sn; 3 — 0,05 % (мас.) Sn; 4 — 0,1 % (мас.) Sn; 5 — 0,5 % (мас.) Sn

Fig. 3. Anode polarization (2 mV/s) curves of the E–AlMgSi alloy (aldrey) (1) containing tin, wt.%.: 0.01 (2), 0.05 (3), 0.1 (4), 0.5 (5), in an electrolyte medium 0.03% (a) and 3% (б) NaCl

анодную реакцию растворения металла, но и сопряженное катодное восстановление растворенного в электролите кислорода. Оксидные пленки на алюминии технической чистоты и его сплавах более проводимы. Этим объясняется существенное ускорение восстановления кислорода, а следовательно, и коррозия сплавов на основе алюминия. В нейтральных растворах оксидные пленки на алюминии проявляют высокое защитное действие, коррозия протекает равномерно, с минимальной скоростью, преимущественно на отдельных дефектах оксидной пленки.

Результаты коррозионно-электрохимического исследования сплава E-AlMgSi (алдрей), легированного оловом, представлены в таблице. Динами-

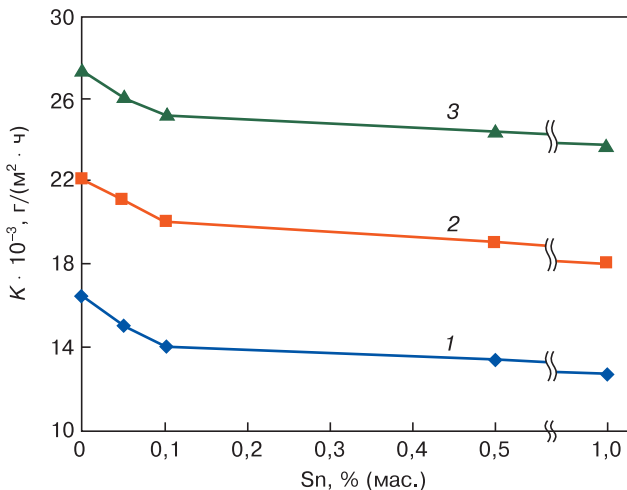


Рис. 4. Зависимости скорости коррозии сплава E-AlMgSi (алдрей) от концентрации олова, в среде 0,03%-ного (1), 0,3%-ного (2) и 3,0%-ного (3) электролита NaCl

Fig. 4. Dependence of the corrosion rate of the E-AlMgSi alloy (Aldrey) on the concentration of tin in the electrolyte medium 0.03% (1); 0.3% (2) and 3.0% (3) NaCl

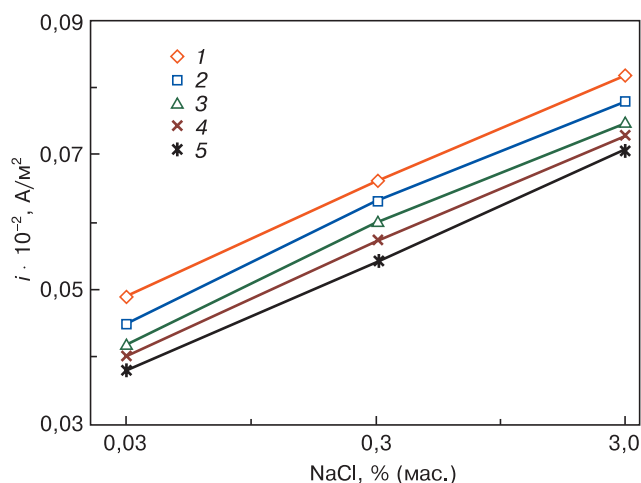


Рис. 5. Зависимости плотности тока коррозии сплава E-AlMgSi (алдрей) (1) с различным содержанием олова от концентрации NaCl:

1 — 0; 2 — 0,01 % (мас.) Sn; 3 — 0,05 % (мас.) Sn;

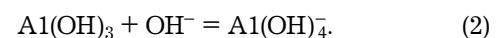
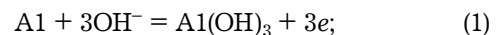
4 — 0,1 % (мас.) Sn; 5 — 0,5 % (мас.) Sn

Fig. 5. Dependence of the current density of the corrosion of the alloy E-AlMgSi (aldray) (1) containing tin, wt.%, 0.01 (2); 0.05 (3); 0.1 (4); 0.5 (5) of the concentration of NaCl

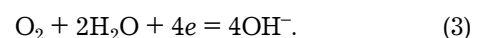
ка изменения потенциала свободной коррозии при увеличении времени выдержки в растворе NaCl (см. рис. 2) позволяют оценить скорость формирования защитного оксидного слоя на поверхности сплава. Так, если для исходного сплава E-AlMgSi (алдрей) стабилизация потенциала свободной коррозии происходит в течение 1 ч, то для сплавов, легированных оловом, данный процесс завершается в течение 30—40 мин, что свидетельствует об ускорении процесса формирования защитного оксидного слоя у легированных оловом сплавов в сравнении с исходным сплавом. У легированных оловом сплавов при увеличении времени выдержки наблюдается смещение потенциала свободной коррозии в область более положительных значений. Наиболее положительное значение потенциала (−0,812 В) имеет сплав E-AlMgSi (алдрей), легированный 1,0 % (мас.) Sn, в среде 0,03%-ного NaCl. Добавление олова независимо от его количества увеличивает потенциал свободной коррозии. При этом величина сдвига потенциала в область положительных значений составляет порядка 54 мВ по сравнению со сплавом E-AlMgSi (алдрей) в среде 3%-ного NaCl. В соответствии с изменением значения потенциала свободной коррозии во времени наиболее интенсивное формирование защитной оксидной пленки на поверхности электрода происходит в течение первых 3—5 мин после погружения электрода в раствор (см. рис. 2).

Коррозионные и электрохимические характеристики исследованных сплавов, представленные в таблице, показывают, что легирование сплава E-AlMgSi (алдрей) оловом способствует сдвигу электрохимических потенциалов в положительную сторону. Свободный потенциал коррозии всех исследованных сплавов находится в пассивной области, т. е. между потенциалами коррозии и питтингообразования. В целом тройные сплавы как по электрохимическим характеристикам, так и по коррозионной стойкости превосходят исходный сплав E-AlMgSi (алдрей). Например, сплавы, содержащие 1,0 % (мас.) олова, по коррозионной стойкости на 20—30 % превосходят исходный сплав E-AlMgSi (алдрей).

Механизм коррозии чистого алюминия в нейтральных средах описывается уравнениями [17]



Процесс лимитируется скоростью доставки ионов  $\text{OH}^-$  к поверхности электрода. Деполаризатором в аэрированных нейтральных растворах является кислород. Его восстановление на границе раздела металл—раствор протекает согласно уравнению





Лимитирует процесс диффузия к электроду растворенного в электролите кислорода, определяющая, в конечном счете, скорость коррозии металла. В качестве промежуточного продукта взаимодействия металла с ионами  $\text{OH}^-$  на поверхности осаждается гидратированный оксид с общей формулой  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ . Различные модификации оксида и гидроксида алюминия хорошо растворимы в щелочных и кислых средах, но практически нерастворимы в нейтральных растворах. По этой причине область практического использования алюминия и его сплавов в жидких средах охватывает в основном только растворы, близкие к нейтральным. В таких растворах оксидные пленки на алюминии проявляют высокое защитное действие, а равномерная коррозия алюминия и его сплавов, как правило, невелика и протекает на отдельных дефектах оксидной пленки [17]. Механизм растворения сплава  $\text{E-AlMgSi}$  (алдрей), легированного оловом, можно объяснить следующим образом [18]. При контакте сплавов с раствором олово как электрохимически активный компонент [19] частично селективно растворяется из твердого раствора, повышая концентрацию вакансий в поверхностном слое, и частично взаимодействует с кислородом воды с образованием  $\text{SnO}_2$ , который накапливается на поверхности. Термодинамическая активность алюминия в дефектном поверхностном слое повышается, что способствует формированию плотного и менее дефектного слоя оксигидроксидов алюминия с высокими защитными свойствами (см. реакции (1) и (2)). Оксид  $\text{SnO}_2$  накапливается в верхней части этого слоя, плотность которого выше плотности  $\text{Al}_2\text{O}_3$  [19]. Потенциал коррозии сплава, покрытого плотным малодефектным слоем оксигидроксидов алюминия и оксидом олова, повышается, а скорость восстановления деполяризатора и, следовательно, скорость коррозии сплава, содержащего олово, снижается. Не растворимый в водных растворах и не образующий смешанных оксидов с алюминием из-за различия периодов кристаллических решеток  $\text{SnO}_2$  накапливается на поверхности, механически блокируя ее и препятствуя как растворению сплава при анодной поляризации, так и образованию питтингов.

### Заключение

На основе проведенных исследований подобран легирующий элемент, малые добавки которого позволяют повысить коррозионную стойкость сплава  $\text{E-AlMgSi}$  (алдрей). Разработанный сплав по коррозионной стойкости превосходит почти на 20—30 %, используемый в настоящее время как проводник сплав  $\text{E-AlMgSi}$  (алдрей).

### Библиографический список

1. Усов В. В., Займовский А. С. Проводниковые, реостатные и контактные материалы. Материалы и сплавы в электротехнике. В 2-х томах. Т. 2. М.—Л.: Госэнергоиздат, 1957. 184 с.
2. Дриц М. Е. Алюминиевые сплавы: свойства, обработка, применение. М.: Металлургия, 1979. 680 с.
3. Алиева С. Г., Альтман М. Б., Амбарцумян С. М. и др. Промышленные алюминиевые сплавы: Справочник / Отв. ред. Ф. И. Квасов, И. Н. Фридляндер. М.: Металлургия, 1984. 528 с.
4. Беляев А. И., Бочвар О. С., Буйнов Н. Н. и др. Металловедение алюминия и его сплавов / Отв. ред. И. Н. Фридляндер. М.: Металлургия, 1983. 280 с.
5. Кеше Г. Коррозия металлов. М.: Металлургия, 1984. 400 с.
6. Бердиев А. Э., Ганиев И. Н., Ниезов Х. Х., Обидов Ф. У., Исмоилов Р. А. Влияние иттрия на анодное поведение сплава АК1М2 // Известия вузов. Материалы электронной техники. 2014. Т. 17, № 3. С. 224—227. DOI: 10.17073/1609-3577-2014-3-224-227
7. Джайлоев Дж. Х., Ганиев И. Н., Амонов И. Т., Якубов У. Ш. Анодное поведение сплава  $\text{Al}+2.18\%\text{Fe}$ , легированного стронцием, в среде электролита  $\text{NaCl}$  // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2019. № 1. С. 42—46.
8. Ганиев И. Н., Якубов У. Ш., Сангов М. М., Хакимов А. Х. Анодное поведение сплава АЖ5К10, модифицированного стронцием, в среде электролита  $\text{NaCl}$  // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2017. № 4. С. 57—62.
9. Якубов У. Ш., Ганиев И. Н., Сангов М. М. Электрохимическая коррозия сплава АЖ5К10, модифицированного барием, в среде электролита  $\text{NaCl}$  // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). 2018. № 43. С. 21—25.
10. Одинаев Ф. Р., Ганиев И. Н., Сафаров А. Г., Якубов У. Ш. Стационарные потенциалы и анодное поведение сплава АЖ 4.5, легированного висмутом // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). 2017. № 38. С. 8—12.
11. Якубов У. Ш., Ганиев И. Н., Сангов М. М., Ганиева Н. И. О коррозионном потенциале сплава АЖ5К10, модифицированного щелочноземельными металлами, в среде электролита  $\text{NaCl}$  // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т. 16, № 3. С. 109—119. DOI: 10.18503/1995-2732-2018-16-3-109-119
12. Якубов У. Ш., Ганиев И. Н., Сангов М. М., Амини Р. Н. Влияние добавок кальция на коррозионно-электрохимическое поведение сплава АЖ5К10, в водных растворах  $\text{NaCl}$  // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер.: Металлургия. 2018. Т. 18, № 3. С. 5—15. DOI: 10.14529/met180301
13. Ганиев И. Н., Аминбекова М. С., Эшов Б. Б., Якубов У. Ш., Муллоева Н. М. Анодное поведение свинцового сплава  $\text{SSu3}$  с кадмием в среде электролита  $\text{NaCl}$  // Вестник технологического университета. 2019. Т. 22, № 1. С. 42—46.
14. Ганиев И. Н., Джайлоев Дж. Х., Амонов И. Т., Эсанов Н. Р. Влияние щелочноземельных металлов на анодное поведение сплава  $\text{Al}+2.18\%\text{Fe}$  в нейтральной среде // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2017. № 3. С. 40—44.
15. Идиев И. Ш., Норова М. Т., Ганиев И. Н., Алиханова С. Дж. Электрохимические потенциалы цинкового сплава ЦАМг4,5-2 с лантаном, в среде электролита  $\text{NaCl}$  // Вестник технологического университета. 2019. Т. 22, № 4. С. 64—67.
16. Barkov A. A. Mechanochemistry and pitting on zirconium in hydrochloric ACID solutions // Protection of Metal. 1999. V. 35, N 5. P. 420—424.
17. Полинг Л. Общая химия. М.: Мир, 1974. 846 с.
18. Каримова Т. М., Ганиев И. Н., Красноярский В. В. Исследование коррозионно-электрохимического поведения  $\text{Al-Mn}$  в нейтральных средах // Журнал прикладной химии. 1988. Т. 61, № 1. С. 51—54.
19. Ганиев И. Н., Юнусов И., Красноярский В. В. Исследование анодного поведения сплавов системы алюминий—скандий (иттрий, празеодим, неодим) в нейтральной среде // Журнал прикладной химии. 1987. Т. 60, № 9. С. 2119—2123.

Статья поступила в редакцию 6 августа 2019 г.

*Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronics Engineering*. 2019, vol. 22, no. 2, pp. 128—134.  
DOI: 10.17073/1609-3577-2019-2-128-134

## Corrosion–electrochemical behavior of an aluminum conductive E–AlMgSi alloy (aldrey) with tin in the environment of NaCl electrolyte

I. N. Ganiev<sup>1,§</sup>, A. P. Abulakov<sup>2</sup>, J. H. Jayloev<sup>3</sup>, F. A. Aliev<sup>2</sup>, A. R. Rashidov<sup>4</sup>

<sup>1</sup>*Tajik Technical University named after Academician M. S. Osimi, 10 Radjabov Ave., Dushanbe 734042, Tajikistan*

<sup>2</sup>*Dangara State University, 25 Markazi Str., Dangara 735320, Tajikistan*

<sup>3</sup>*Institute of Chemistry named after V. I. Nikitina, Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan, 299/2, Sadriddin Ayni Str., Dushanbe 734063, Tajikistan*

<sup>4</sup>*Energy Institute of Tajikistan, Nosiri Khusrav Str., Bokhtariyon, Khatlon Region 735162, Tajikistan*

**Annotation.** The economic feasibility of using aluminum as a conductive material is explained by the favorable ratio of its cost to the cost of copper. In addition, one should take into account the factor that the cost of aluminum remains practically unchanged for many years. When using conductive aluminum alloys for the manufacture of thin wire, winding wire, etc. Certain difficulties may arise in connection with their insufficient strength and a small number of kinks before fracture. In recent years, aluminum alloys have been developed, which even in a soft state have strength characteristics that allow them to be used as a conductive material. One of the promising areas for the use of aluminum is the electrical industry. Conductive aluminum alloys type E–AlMgSi (aldrey) are representatives of this group of alloys and treats heat–strengthened alloys. They are distinguished by high strength and good ductility. These alloys with appropriate heat treatment acquires high electrical conductivity. The wires made from it are used almost exclusively for overhead power lines.

In the work presents the results of the study of the anodic behavior of aluminum alloy E–AlMgSi (aldrey) with tin, in a medium electrolyte 0.03; 0.3 and 3.0% NaCl. A corrosion–electrochemical study of alloys was carried out using the potentiostatic method on a PI–50–1.1 potentiostat at a potential sweep rate of 2 mV/s. It is shown that alloying E–AlMgSi (aldrey) c with tin increases its corrosion resistance by 20%. The main electrochemical potentials of the alloys when doping with tin are shifted to the positive range of values, and from the concentration of sodium chloride in the negative direction of the ordinate axis.

**Keywords:** E–AlMgSi (aldrey) alloy, tin, potentiostatic method, electrolyte NaCl, free corrosion potential, corrosion potential, pitting potential, corrosion rate

### References

1. Usov V. V., Zaimovsky A. S. *Provodnikovye, reostatnye i kontaktные материалы. Materialy i splavy v elektrotekhnike* [Conductor, rheostat and contact materials. Materials and alloys in electrical engineering]. Vol. II. Moscow: Gosenergoizdat, 1957, 184 p. (In Russ.)
2. Drits M. E. *Alyuminievye splavy: svoystva, obrabotka, primeneniye* [Aluminum alloys: properties, processing, application]. Moscow: Metallurgiya, 1979, 680 p. (In Russ.)
3. Alieva S. G., Al'tman M. B., Ambartsumyan S. M. et al. *Promyshlennyye alyuminievye splavy* [Industrial aluminum alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1984, 528 p. (In Russ.)
4. Belyaev A. I., Bochvar O. S., Buinov N. N. et al. *Metallovedeniye alyuminiya i ego splavov* [Metallurgy of aluminum and its alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1983, 280 p. (In Russ.)
5. Keshe G. *Korroziya metallov* [Corrosion of metals]. Moscow: Metallurgiya, 1984, 400 p. (In Russ.)
6. Berdiev A. E., Ganiev I. N., Niyozov H. H., Obidov F. U., Ismoilov R. A. Influence of yttrium on the anodic behavior of the alloy AK1M2. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Materialy Elektronnoi Tekhniki = Materials of Electronics Engineering*, 2014, vol. 17, no. 3, pp. 224—227. (In Russ.). DOI: 10.17073/1609-3577-2014-3-224-227
7. Dzhayloev Dzh. Kh., Ganiev I. N., Amonov I. T., Yakubov U. Sh. Anodic behavior of Al+2,18%Fe alloy doped with strontium in electrolyte medium NaCl. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*, 2019, no. 1, pp. 42—46. (In Russ.)
8. Ganiev I. N., Yakubov U. Sh., Sangov M. M., Khakimov A. Kh. Anodic behavior of strontium–modified alloy AЖ5K10 in NaCl electrolyte. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*, 2017, no. 4, pp. 57—62. (In Russ.)
9. Yakubov U. Sh., Ganiev I. N., Sangov M. M. Electrochemical corrosion of barium–modified AlFe5Si10 alloy in medium of NaCl

electrolyte. *Bulletin of the St. Petersburg State Technological Institute (Technical University)*, 2018, no. 43, pp. 21—25. (In Russ.)

10. Odinaev F. R., Ganiev I. N., Safarov A. G., Yakubov U. Sh. Stationary potentials and anodic behavior of AF 4.5 alloy doped with bismuth. *Bulletin of the St. Petersburg State Technological Institute (Technical University)*, 2017, no. 38, pp. 8—12. (In Russ.)

11. Yakubov U. Sh., Ganiev I. N., Sangov M. M., Ganieva N. I. On the corrosion potential of AlFe5Si10 alloy inoculated with alkaline–earth metals in the NaCl medium. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*, 2018, vol. 16, no. 3, pp. 109—119. (In Russ.). DOI: 10.18503/1995-2732-2018-16-3-109-119

12. Yakubov U. Sh., Ganiev I. N., Sangov M. M., Amini R. N. Influence addition of calcium on corrosion–electrochemical behavior of alloy AF5Si10 in aqueous solutions NaCl. *Bulletin of the South Ural State University. Series «Metallurgy»*, 2018, vol. 18, no. 3, pp. 5—15. (In Russ.). DOI: 10.14529/met180301

13. Ganiev I. N., Aminbekova M. S., Eshov B. B., Yakubov U. Sh., Mulloeva N. M. Anodic behavior of a lead–antimony 3 alloy with cadmium in NaCl medium. *Bulletin of the Technological University*, 2019, vol. 22, no. 1, pp. 42—46. (In Russ.)

14. Ganiev I. N., Dzhayloev Dzh. Kh., Amonov I. T., Esanov N. R. The influence of alkaline earth metals on the anodic behavior of Al+2.18%Fe alloy in a neutral environment. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*, 2017, no. 3, pp. 40—44. (In Russ.)

15. Idiev I. Sh., Norova M. T., Ganiev I. N., Alikhonova S. J. Electrochemical potentials of zinc alloy ZAMg4.5–2 with lanthanum in a NaCl electrolyte. *Bulletin of the Technological University*, 2019, vol. 22, no. 4, pp. 64—67. (In Russ.)

16. Barkov A. A. Mechanochemistry and pitting on zirconium in hydrochloric ACID solutions. *Protection of Metal*, 1999, vol. 35, no. 5, pp. 420—424.

17. Pauling L. General chemistry. In: Dover Books on Chemistry. Dover Publications, 1988, 992 p.

18. Karimova T. M., Ganiev I. N., Krasnoyarsky V. V. Investigation of the corrosion–electrochemical behavior of Al–Mn in neutral environments. *J. Appl. Chem.*, 1988, vol. 61, no. 1, pp. 51—54. (In Russ.)

19. Ganiev I. N., Yunusov I., Krasnoyarsky V. V. Investigation of the anode behavior of aluminum–scandium alloys (yttrium, praseodymium, neodymium) in a neutral medium. *J. Appl. Chem.*, 1987, vol. 60, no. 9, pp. 2119—2123. (In Russ.)

### Information about author:

**Izatullo N. Ganiev<sup>1,§</sup>**: Academician of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan, Dr. Sci. (Chem.), Professor (ganiev48@mail.ru); **Aslam P. Abulakov<sup>2</sup>**: Assistant; **Jamshed H. Jayloev<sup>3</sup>**: Senior Researcher (husenzod85@mail.ru); **Firdavs A. Aliev<sup>2</sup>**: Assistant (firdavs.aliev.2016@mail.ru); **Akram R. Rashidov<sup>4</sup>**: Assistant (rashidov0909@mail.ru)

§ Corresponding author

Received August 6, 2019