

**НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК ТАДЖИКИСТАНА  
ГНУ «ИНСТИТУТ ХИМИИ им. В.И. НИКИТИНА»**

*На правах рукописи*

**АБДУЛАКОВ Аслам Пирович**

**СВОЙСТВА АЛЮМИНИЕВОГО ПРОВОДНИКОВОГО СПЛАВА  
E-AlMgSi (“АЛДРЕЙ”) С ОЛОВОМ, СВИНЦОМ И ВИСМУТОМ**

Специальность  
**2.6.17 – Материаловедение**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Душанбе – 2022

Работа выполнена в лаборатории «Коррозионностойкие материалы» ГНУ «Институт химии им. В.И. Никитина Национальной академии наук Таджикистана».

**Научный руководитель:** кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник ГНУ «Институт химии им. В.И. Никитина НАН Таджикистана»  
**Джайлоев Джамшед Хусейнович**

**Научный консультант:** доктор технических наук, профессор, директор ГНУ «Институт химии им. В.И. Никитина НАН Таджикистана»  
**Сафаров Ахрор Мирзоевич**

**Официальные оппоненты:** **Назаров Холмурод Марипович** – доктор технических наук, профессор, директор Филиала Агентства по химической, биологической, радиационной и ядерной безопасности НАН Таджикистана в Согдийской области

**Рахимов Фируз Акбарович** – кандидат технических наук, ученый секретарь ГУ «Центр по исследованию инновационных технологий» НАН Таджикистана

**Ведущая организация:** Кулябский государственный университет им. А. Рудаки

Защита состоится «24» октября 2022 года в 9<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета 73.1.002.02 при ГНУ «Институт химии им. В.И. Никитина Национальной академии наук Таджикистана» по адресу: 734063, Республика Таджикистан г. Душанбе, ул. Айни, 299/2. E-mail: dissovet@ikai.tj

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ГНУ «Институт химии им. В.И. Никитина Национальной академии наук Таджикистана» [www.chemistry.tj](http://www.chemistry.tj).

Автореферат разослан « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2022 года

**Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат химических наук**

**Халикова Л.Р.**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Одним из проводниковых алюминиевых сплавов является сплав 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. В связи с тем, что линии электропередачи из алюминия и его сплавов эксплуатируются в открытой атмосфере, вопросы повышения коррозионной стойкости сплавов являются актуальными.

Сплав (“алдрей”) был разработан давно, основное его назначение это изготовление проводов для линий электропередач. Термическая обработка его состоит в том, что прессованную или катаную заготовку закаливают в воде с 510—550°С, затем протягивают и подвергают искусственному старению при 140—180° С. Высокая прочность проводов из сплава «алдрей» позволяет увеличить размеры пролётов воздушных линий электропередач. Высокая твёрдость “алдрея” способствует уменьшению количества повреждений проводов при монтаже. Начало потери прочности у проволоки из “алдрея” лежит около 180—200° С. Предел вибрационной усталости у (“алдрей”) в 1,5 раза выше, чем у алюминия. По сопротивлению действию дуги, возникающей при коротком замыкании проводов из “алдрей” стоят на втором месте после медных и значительно устойчивее проводов из алюминия.

При использовании проводниковых алюминиевых сплавов для изготовления тонкой проволоки, например обмоточного провода и т.д. могут возникнуть определённые сложности в связи с их недостаточной прочностью и малым числом перегибов до разрушения. В работе рассмотрены вопросы улучшения эксплуатационных свойств, т.е. коррозионной устойчивости, окисления, теплофизических и термодинамических характеристик алюминиевого проводникового сплава “алдрей” путём его легирования оловом, свинцом и висмутом. Тема диссертационной работы является неотъемлемой частью научного проекта «Разработка составов новых алюминиевых проводниковых сплавов и выдачи рекомендаций по их использованию предприятиям Республики Таджикистан» разрабатываемого лабораторией «Коррозионностойкие материалы» ГНУ «Институт химии им. В.И. Никитина» НАН Таджикистана на период 2021-2025г.г.

**Целью исследования** является установление термодинамических, кинетических и анодных свойств алюминиевого проводникового сплава E-AlMgSi (“алдрей”), легированного оловом, свинцом и висмутом, предназначенного для нужд электротехнических отраслей промышленности.

**Объектом исследования:** сплавы алюминия различного назначения, в частности используемые в машиностроении, авиации в электротехники и т.д.

**Предметом исследования** являлся синтез новых алюминиевых проводниковых сплавов серии E-AlMgSi (“алдрей”), легированного оловом, свинцом и висмутом.

**Задачи исследования.** Изучение температурной зависимости теплоёмкости и изменений термодинамических функций алюминиевого проводникового сплава E-AlMgSi (“алдрей”) с оловом, свинцом и висмутом.

- Изучение кинетики окисления алюминиевого проводникового сплава E-AlMgSi (“алдрей”) с оловом, свинцом и висмутом, в твёрдом состоянии и определение механизма процесса их окисления.

- Экспериментальное определение влияния олова, свинца и висмута на анодное поведение алюминиевого проводникового сплава E-AlMgSi (“алдрей”), в среде электролита NaCl.

- Оптимизация состава четырёхкомпонентные сплавов на основе установления их физико-химических свойств и определении возможных областей их использования.

**Методы исследования:** определение теплоёмкости сплавов в режиме «охлаждения» с использованием автоматической регистрации температуры образца от времени охлаждения; термогравиметрический метод исследования кинетики окисления металлов и сплавов в твёрдом состоянии; электрохимический метод исследования анодных свойств сплавов потенциостатический методом.

**Отраслям исследования** является материаловедения и технология синтеза новых алюминиевых проводниковых сплавов типа E-AlMgSi (“алдрей”).

**Этапы исследования** включают синтез и сертификацию новых алюминиевых проводниковых сплавов E-AlMgSi (“алдрей”) с оловом, свинцом и висмутом; исследование их тепловых, теплофизических, кинетических и анодных характеристик.

**Основная информация и экспериментальная база.** Экспериментальные исследования выполнены с помощью известных научных оборудований: импульсного потенциостата ПИ-50-1.1; термогравиметрических весов; прибора для измерения теплоёмкости твёрдых тел в режиме «охлаждения». Математическая обработка результатов проводилась с использованием стандартного пакета приложений и программ Microsoft Excel и Sigma Plot.

**Достоверность результатов диссертационных исследований** обеспечивается применением современных методов исследований на тарированных модернизированных и усовершенствованных приборах и установках, их воспроизводимостью и сравнением результатов с данными других авторов.

**Научная новизна исследований.**

- Установлены основные закономерности изменения теплоёмкости и термодинамических функций (энтальпия, энтропия и энергия Гиббса) алюминиевого проводникового сплава E-AlMgSi (“алдрей”) с оловом, свинцом

и висмутом в зависимости от температуры и количества легирующего компонента. Показано, что с ростом температуры теплоёмкость, энтальпия и энтропия алюминиевого проводникового сплава E-AlMgSi (“алдрей”) с оловом, свинцом и висмутом увеличиваются, а энергия Гиббса сплавов уменьшается.

- Показано, что с ростом температуры скорость окисления алюминиевого проводникового сплава E-AlMgSi (“алдрей”) с оловом, свинцом и висмутом, в твёрдом состоянии увеличивается. Константа скорости окисления имеет порядок  $10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . Установлено, что окисление алюминиевого сплава E-AlMgSi (“алдрей”) с оловом, свинцом и висмутом подчиняется гиперболическому закону.

- Потенциостатическим методом в потенциодинамическом режиме при скорости развертки потенциала 2 мВ/с установлено, что добавки легирующих компонентов до 1,0 мас.% увеличивают коррозионную стойкость исходного сплава E-AlMgSi (“алдрей”) на 30-40%. При этом отмечается сдвиг потенциалов коррозии, питтингообразования и репассивации исходного сплава в положительную область. При переходе от сплавов с оловом к сплавам со свинцом и висмутом наблюдается уменьшение скорости коррозии (для сплавов с 1,0 мас.% добавки).

**Теоретическая ценность исследования.** В диссертации изложены теоретические аспекты исследований: доказательства влияния структуры, температурной зависимости теплоёмкости и изменений термодинамических функций, закономерности изменения коррозионно-электрохимических, кинетических и энергетических характеристик сплава алюминия E-AlMgSi (“алдрей”) с оловом, свинцом и висмутом; влияния коррозионной среды и концентрации легирующих добавок на коррозионную стойкость и окисляемость алюминиевого сплава E-AlMgSi (“алдрей”).

**Практическая ценность исследования.** Выполненные исследования позволили выявить составы сплавов, отличающихся наименьшей окисляемостью при высоких температурах и подобрать оптимальные концентрации легирующих добавок (олова, свинца и висмута) для повышения коррозионной стойкости исходного сплава E-AlMgSi (“алдрей”).

В целом на основе проведённых исследований отдельные составы алюминиевого проводникового сплава E-AlMgSi (“алдрей”) с оловом, свинцом и висмутом защищены четыре малыми патентами Республики Таджикистан.

**Положения, выносимые защиту.**

- Результаты исследования температурных зависимостей теплоёмкости и изменений термодинамических функций алюминиевого проводникового сплава E-AlMgSi (“алдрей”) с оловом, свинцом и висмутом.

- Кинетические и энергетические параметры процесса окисления алюминиевого проводникового сплава E-AlMgSi (“алдрей”) с оловом, свинцом и висмутом, а также механизм окисления сплавов.

- Зависимости анодных характеристик и скорости коррозии алюминиевого сплава E-AlMgSi (“алдрей”) с оловом, свинцом и висмутом от концентрации легирующего компонента, в среде электролита NaCl.
- Оптимальные составы сплавов, отличающихся наименьшей окисляемостью и повышенной коррозионной стойкостью, представляющие интерес в качестве проводникового материала для изготовления линии электропередач.

**Личный вклад соискателя** заключается в анализе литературных данных, в постановке и решении задач исследований, подготовке и проведении экспериментальных исследований в лабораторных условиях, анализе полученных результатов, в формулировке основных положений и выводов диссертации.

**Апробация диссертации и информации об использовании ее результатов.** Основные положения диссертации обсуждались на: Респ. научно-прак. конф. «Актуальные проблемы индустриализации Республики Таджикистан: проблемы и стратегии», часть 1. ТУТ, (г. Душанбе, 2019); Респ. научно-прак. конф. «Инновационное развитие науки», ГНУ «Центр исследования инновационных технологий при НАНТ, (г. Душанбе, 2020); Межд. научно-прак. конф. «Развитие энергетики и возможности», (г. Бохтар, 2020); Межд. научно-прак. конф. «Индустриально-инновационное развитие экономики РТ: состояние, проблемы и перспективы», МИСиС, (г. Душанбе, 2020); Респ. научно-прак. конф. «Актуальные вопросы естественных наук и технологий», посвящённая 20-летию изучения и развития естественных, точных и математических наук РТСУ, (г. Душанбе, 2020); Респ. научно-прак. конф. «Развитие энергетической отрасли в Республике Таджикистан», ТК ТТУ, (г. Душанбе, 2021); Мат. Респ. научно-теор. конф. «Проблемы современной химии и состояния ее внедрения в учебный процесс», ДГУ, (г. Дангара, 2022).

**Опубликование результатов диссертации.** По результатам исследований опубликовано 15 научных работ, из них 4 статьи в рецензируемых журналах, рекомендуемых ВАК Министерства высшего образования и науки Российской Федерации и 7 статей в материалах международных и республиканских конференций. Также получено 4 малых патента Республики Таджикистан.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав и приложения, изложена на 155 страницах компьютерного набора, включает 69 рисунка, 48 таблиц, 108 библиографических наименований.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** изложены предпосылки и основные проблемы исследования, обоснована актуальность работы, раскрыта структура диссертации.

**В первой главе** описано структурообразование алюминиевых сплавов с оловом, свинцом и висмутом; теплоемкость алюминия, магния, кремния, олова, свинца и висмута; особенности окисления и коррозионно-электрохимического поведения сплавов алюминия с оловом, свинцом и висмутом в различных средах. На основе выполненного обзора показано, что теплоемкость алюминия, магния, кремния, олова, свинца и висмута хорошо изучены. Однако в литературе отсутствует информация о теплоёмкости и термодинамических свойствах, коррозионно-электрохимическом поведении и особенностях окисления алюминиевого проводникового сплава E-AlMgSi (“алдрей”) с оловом, свинцом и висмутом.

Таким образом, в связи с отсутствием систематических данных о физико-химических свойствах алюминиевого проводникового сплава E-AlMgSi (“алдрей”) с оловом, свинцом и висмутом последние были взяты в качестве объекта исследования в данной диссертационной работе.

## **ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И ИЗМЕНЕНИЙ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ АЛЮМИНИЕВОГО ПРОВОДНИКОВОГО СПЛАВА E-AlMgSi (“алдрей”), ЛЕГИРОВАННОГО ОЛОВОМ, СВИНЦОМ И ВИСМУТОМ**

Экономическая целесообразность применения алюминия в качестве проводникового материала объясняется благоприятным соотношением его стоимости и стоимости меди. Немаловажным является и то, 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 определённые 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.

В связи с этим цель настоящих исследований заключается в установлении влияния добавок олова, свинца и висмута на теплоёмкость и изменений термодинамических функций алюминиевого проводникового сплава E-AlMgSi (“алдрей”). В литературе нами не обнаружены сведения о физико-химических свойствах алюминиевого проводникового сплава E-AlMgSi (“алдрей”), легированного оловом, свинцом и висмутом.

Синтез сплавов проводилось в шахтной лабораторной печи сопротивления типа СШОЛ при температуре  $750^{\circ} - 800^{\circ} \text{C}$ . В качестве шихты при получении сплава E-AlMgSi использовали алюминий марки А6, который дополнительно легировалось расчётным количеством кремния и магния. При легировании алюминия кремнием учитывалось имеющейся в составе первичного алюминия кремний (0.1мас.%) металлический. Магний, завернутый в алюминиевой фольге, вводилось в расплав алюминия с помощью колокольчика. Металлические олова, свинец и висмут вводились в расплав

алюминия в завернутом в алюминиевой фольге виде. Химический анализ полученных сплавов на содержание кремния, железа и магния проводилось в Центральной заводской лаборатории ГУП «Таджикская алюминиевая компания». Состав сплавов также контролировалось взвешиванием шихты и полученных сплавов. При отклонении веса сплавов более чем на 1-2% отн. синтез сплавов проводился заново. Далее из расплава удалялось шлак и производилось литьё образцов в графитовую изложницу для исследования различных свойств. Образцы цилиндрической формы имели диаметр 16мм и длину 30мм.

Измерение теплоемкости проводилось на установке, схема которой подробно описан в диссертации. Точность измерения температуры составляла 0,1 °С. Относительная ошибка измерения температуры в интервале от 40 °С до 400 °С составляла ±1%. Погрешность измерения теплоемкости по предлагаемой методике не превышает 4-6% в зависимости от температуры.

Обработка результатов измерений производилось с помощью программы MS Excel. Графики строились с помощью программы Sigma Plot. Значения коэффициента корреляции составлял величину  $R_{\text{корр}} > 0,9899$  подтверждая правильность выбора аппроксимирующей функции.

Экспериментально полученные временные зависимости температуры образцов (рисунок 1а) описываются уравнением вида

$$T = a e^{-b\tau} + p e^{-k\tau}, \quad (1)$$

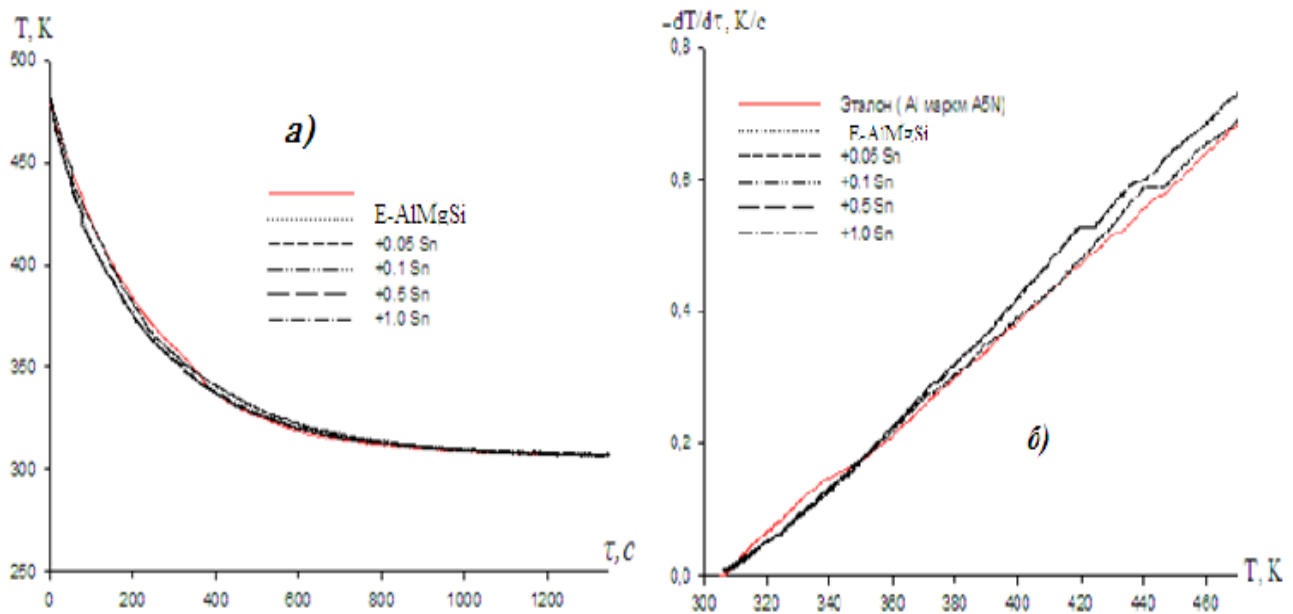
где  $a, b, p, k$  – константы;  $\tau$  - время охлаждения.

Дифференцируя (1) по  $\tau$  получаем уравнение для скорости охлаждения образцов

$$dT / d\tau = -abe^{-b\tau} - pke^{-k\tau}. \quad (2)$$

По уравнению (2) были вычислены скорости охлаждения образцов из сплава E-AlMgSi (“алдрей”), легированного оловом, которые приставлены на рисунке 1б. Значения коэффициентов  $a, b, p, k, ab, pk$  в уравнении (2) для исследованных сплавов приведены в таблице 1.





**Рисунок 1-** график зависимости температуры от времени охлаждения (а) и скорости охлаждения образцов от температуры (б)

**Таблица 1** - Значения коэффициентов  $a, b, p, k, ab, pk$  уравнении (2) для алюминиевого проводникового сплава E-AlMgSi (“алдрей”), легированного оловом и эталона (Al марки А5N) [2, 4].

Содержание олова в сплаве, мас. %	$a, K$	$b \cdot 10^{-3}, c^{-1}$	$p, K$	$k \cdot 10^{-5}, c^{-1}$	$ab \cdot 10^{-1}, Kc^{-1}$	$pk \cdot 10^{-3}, Kc^{-1}$
0.0	165,61	4,46	314,72	2,27	7,38	7,14
0.05	165,46	4,46	315,19	2,32	7,38	7,31
0.1	160,74	4,74	315,40	2,11	7,61	6,64
0.5	159,23	4,73	314,76	1,10	7,54	5,62
1.0	159,23	4,73	314,86	2,10	7,54	6,62
Эталон	174,88	4,11	305,62	3,2	7,19	1,00

Далее по рассчитанным значениям величин скоростей охлаждения образцов из сплавов, по уравнению (3) была вычислена удельная теплоёмкость алюминиевого сплава E-AlMgSi (“алдрей”), легированного оловом и эталона (Al марки А5N):

$$C_{P_2}^0 = C_{P_1}^0 \frac{m_1}{m_2} \cdot \frac{\left( \frac{dT}{d\tau} \right)_1}{\left( \frac{dT}{d\tau} \right)_2}, \quad (3)$$

где  $m_1 = \rho_1 V_1$  – масса эталона;

$m_2 = \rho_2 V_2$  – масса исследуемого образца;

$\left(\frac{dT}{d\tau}\right)_2, \left(\frac{dT}{d\tau}\right)_1$  – скорости охлаждения образцов из сплавов и эталона при

данной температуре.

Проводя полиномиальную регрессию, было получено следующее уравнение (4) для температурной зависимости удельной теплоёмкости алюминиевого проводникового сплава E-AlMgSi (альдрей), легированного оловом

$$C_{p_0}^0 = a + bT + cT^2 + dT^3 \quad (4)$$

Значения коэффициентов  $a, b, c, d$  уравнении (4) приведены в таблице 2.

**Таблица 2** - Значения коэффициентов  $a, b, c, d$  уравнении (4) для образцов из алюминиевого проводникового сплава E-AlMgSi (“альдрей”), легированного оловом и эталона (Al марки А5N) [2, 4].

Содержание олова в сплаве, мас. %	$a,$ Дж/(кг·К)	$b,$ Дж/(кг·К <sup>2</sup> )	$c,$ Дж/(кг·К <sup>3</sup> )	$d \cdot 10^{-4},$ Дж/(кг·К <sup>4</sup> )	Коэффициент корреляции R
0.0	-10400,00	84,29	-0.2084	1.71	0.9925
0.05	-9056,05	73,75	-0,1817	1,49	0.9899
0.1	-11502,50	88,75	-0,2125	1,70	0.9950
0.5	-11449,86	88,65	-0,2129	1,71	0.9969
1.0	-11377,84	88,08	-0,2116	1,70	0,9970
Эталон	645.88	0.35	0.00	0.00	1.0

Результаты расчёта теплоёмкости сплавов по формуле (3) через 25 К представлены в таблице 3 и на рисунке 2а. Теплоёмкость сплавов от концентрации олова в алюминиевом сплаве E-AlMgSi (“альдрей”) уменьшается, а от температуры увеличивается.

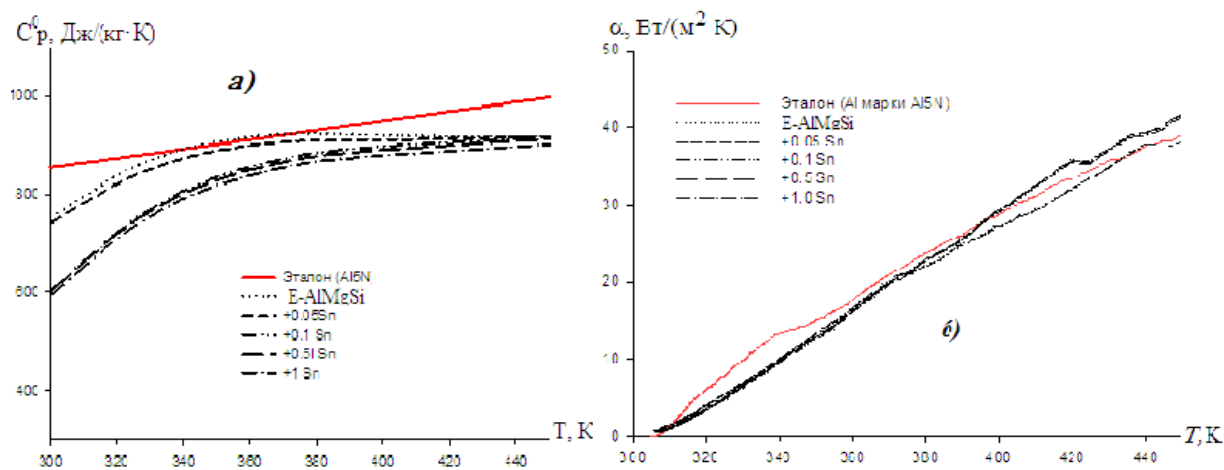
Используя значения удельной теплоёмкости алюминиевого проводникового сплава E-AlMgSi (“альдрей”), легированного оловом и экспериментально полученные значения скоростей охлаждения образцов из сплавов, вычислили температурную зависимость коэффициента теплоотдачи сплава E-AlMgSi (“альдрей”) по уравнению

$$\alpha = \frac{C_{p_0}^0 m \frac{dT}{d\tau}}{(T - T_0) \cdot S}, \quad (5)$$

где  $T$  и  $T_0$  – температура образца и окружающей среды;  $S, m$  – площадь поверхности и масса образца, соответственно. Температурная зависимость коэффициента теплоотдачи для алюминиевого проводникового сплава E-AlMgSi (“альдрей”), легированного оловом представлена на рисунке 5.

**Таблица 3** - Температурная зависимость удельной теплоёмкости (кДж/(кг·К)) алюминиевого проводникового сплава E-AlMgSi (“алдрей”), легированного оловом и эталона (Al марки А5N) [2, 4].

Содержание олова в сплаве, мас. %	T, К					
	300	325	350	375	400	450
0.0	751,00	855,36	907,62	923,83	920,00	916,37
0.05	740,98	837,72	888,94	908,59	910,66	917,87
0.1	602,50	747,96	835,00	879,53	897,50	917,50
0.5	601,49	744,31	829,43	872,85	890,62	913,31
1.0	592,68	734,25	818,51	861,39	878,84	901,17
Эталон	854,61	877,90	901,55	925,45	949,47	997,46



**Рисунок 2-** Температурная зависимость удельной теплоёмкости (а) коэффициент теплоотдачи (б) алюминиевого проводникового сплава E-AlMgSi (“алдрей”), легированного оловом и эталона (Al марки А5N) [2, 4]

Для расчета температурной зависимости изменений энтальпии, энтропии и энергии Гиббса по уравнениям (6)-(8) были использованы интегралы от удельной теплоёмкости по уравнению (4):

$$[H^0(T) - H^0(T_0)] = a(T - T_0) + \frac{b}{2}(T^2 - T_0^2) + \frac{c}{3}(T^3 - T_0^3) + \frac{d}{4}(T^4 - T_0^4); \quad (6)$$

$$[S^0(T) - S^0(T_0)] = a \ln \frac{T}{T_0} + b(T - T_0) + \frac{c}{2}(T^2 - T_0^2) + \frac{d}{3}(T^3 - T_0^3); \quad (7)$$

$$[G^0(T) - G^0(T_0)] = [H^0(T) - H^0(T_0)] - T[S^0(T) - S^0(T_0)], \quad (8)$$

где  $T_0 = 298,15\text{K}$ .

Результаты расчёта температурных зависимостей изменений энтальпии, энтропии и энергии Гиббса по уравнениям (6)-(8) через 25 К представлены в таблице 4.

**Таблица 4** - Температурная зависимость изменений термодинамических функций алюминиевого проводникового сплава E-AlMgSi (“алдрей”), легированного оловом и эталона (Al марки А5N) [2, 4]

Содержание олова в сплаве, мас.%	Т.К					
	300	325	350	375	400	450
	[ $H^0(T) - H^0(T_0^*)$ ], кДж/кг для сплавов					
0.0	1,3799	21,5847	43,7138	66,6654	89,7383	135,4471
0.05	1.3622	21.2055	42.8692	65.3897	88.1525	133.6935
0.1	1.1022	18.1214	38.0136	59.5172	81.7688	127.0553
0.5	1.1005	18.0601	37.8355	59.1842	81.2643	126.2558
1.0	1.0733	17.6396	36.9832	57.8704	79.4659	123.4339
Эталон	1,5795	23,2351	45,4777	68,3149	91,7514	140,4266
	[ $S^0(T) - S^0(T_0^*)$ ], кДж/(кг·К) для сплавов					
0.0	0,0046	0,0692	0,1348	0,1982	0,2577	0,3654
0.05	0.0045	0.0680	0.1322	0.1943	0.2531	0.3604
0.1	0.0037	0.0581	0.1170	0.1764	0.2338	0.3404
0.5	0.0037	0.0579	0.1165	0.1754	0.2324	0.3383
1.0	0.0036	0.0566	0.1139	0.1715	0.2272	0.3308
Эталон	0,0053	0,0746	0,1405	0,2035	0,2640	0,3786
	[ $G^0(T) - G^0(T_0^*)$ ], кДж/кг для сплавов					
0.0	-0,0043	-0,9209	-3,4739	-7,6429	-13,3499	-28,9837
0.05	-0.0042	-1.0111	-3.7067	-8.0132	-13.8628	-29.9625
0.1	-0.0042	-0.9209	-3.4738	-7.6429	-13.3499	-28.9837
0.5	-0.0042	-0.9060	-3.4114	-7.5000	-13.1015	-28.4902
1.0	-0.0033	-0.7605	-2.9452	-6.6146	-11.7467	-26.1462
Эталон	-0,0049	-1,0111	-3,7068	-8,0133	-13,8629	-29,9625

\* $T_0 = 298.15$  К

**Таблица 5** - Зависимости удельной теплоёмкости алюминиевого проводникового сплава E-AlMgSi (“алдрей”), легированного оловом, свинцом и висмутом и эталона (Al марки А5N) от температуры [2, 3, 13]

Содержание легирующего компонента в сплаве, мас. %	Т, К					
	300	325	350	375	400	450
0,0	751,00	855,36	907,62	923,83	920,00	916,37
1.0 Sn	592,68	734,25	818,51	861,39	878,84	901,17
1.0 Pb	579,89	724,71	807,57	845,99	857,50	869,93
1.0 Bi	557,44	690,13	769,55	810,40	827,42	951,40
Эталон	854,62	877,90	901,55	925,45	949,48	997,46

**Таблица 6** - Зависимости изменений энтальпии, энтропии и энергии Гиббса для алюминиевого сплава E-AlMgSi (“алдрей”), легированного Sn, Pb и Bi и эталона (Al марки А5N) от температуры [2, 3, 13]

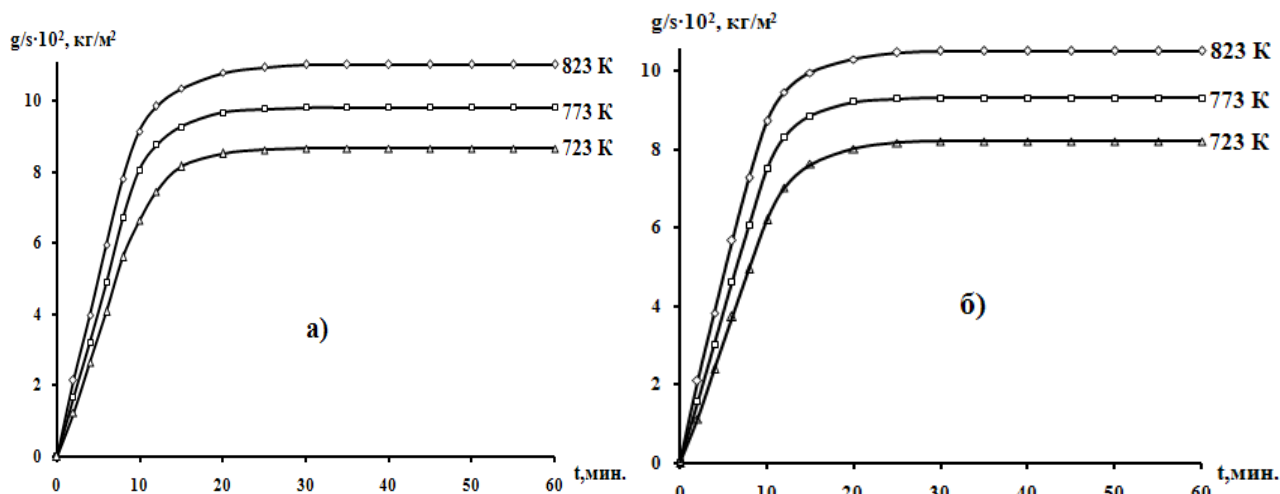
Содержание легирующего компонента в сплаве, мас. %	Т, К					
	300	325	350	375	400	450
	$[H^0(T) - H^0(T_0^*)]$ , кДж/кг для сплавов					
0,0	1,3799	21,5847	43,7138	66,6654	89,7383	135,4471
1.0 Sn	1.0733	17.6396	36.9832	57.8704	79.4659	123.4339
1.0 Pb	1.0602	17.515	36.7797	57.5235	78.855	121.904
1.0 Bi	1,0794	17,7886	37,3691	58,5658	80,5244	117,216
Эталон	1,5795	23,2351	45,4777	68,3149	91,7514	140,4266
	$[S^0(T) - S^0(T_0^*)]$ , кДж/(кг·К) для сплавов					
0,0	0,0046	0,0692	0,1348	0,1982	0,2577	0,3654
1.0 Sn	0.0036	0.0566	0.1139	0.1715	0.2272	0.3308
1.0 Pb	0,0035	0,0562	0,1132	0,1705	0,2255	0,3269
1.0 Bi	0,0034	0,0537	0,1080	0,1627	0,2156	0,3141
Эталон	0,0053	0,0746	0,1405	0,2035	0,2640	0,3786
	$[G^0(T) - G^0(T_0^*)]$ , кДж/кг для сплавов					
0,0	-0,0043	-0,9209	-3,4739	-7,6429	-13,3499	-28,9837
1.0 Sn	-0.0033	-0.7605	-2.9452	-6.6146	-11.746	-26.1462
1.0 Pb	-0,0032	-0,7341	-2,8473	-6,3959	-11,351	-25,2071
1.0 Bi	-0,0031	-0,7029	-2,7201	-6,1056	-10,839	-24,120
Эталон	-0,0049	-1,0111	-3,7068	-8,0133	-13,8629	-29,9625

В таблицах 5,6 обобщены результаты исследования теплоёмкости и термодинамических функций алюминиевого сплава E-AlMgSi (“алдрей”), легированного оловом, свинцом и висмутом. При переходе от сплавов с оловом к сплавам с висмутом, теплоёмкость, энтальпия и энтропия сплавов уменьшаются, значение энергии Гиббса растёт.

### ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ОКИСЛЕНИЯ АЛЮМИНИЕВОГО ПРОВОДНИКОВОГО СПЛАВА E-AlMgSi (“алдрей”), ЛЕГИРОВАННОГО ОЛОВОМ, СВИНЦОМ И ВИСМУТОМ

Для определения скорости окисления чаще всего пользуются термогравиметрическим методом, который получил широкое применение при изучении кинетики окисления твёрдых и жидких металлов. К достоинствам данного метода следует отнести относительную простоту аппаратного оформления и возможности его использования для высоких температур (>1773К).

Нами изучена кинетика окисления алюминиевого проводникового сплава E-AlMgSi (алдрей), легированного оловом, в количествах 0.05; 0.1; 0.5; 1.0 мас.%. Кинетические и энергетические параметры процесса окисления данных сплавов приведены на рисунках 3-6 и в таблицах 7-9.



**Рисунок 3** – Кинетические кривые окисления алюминиевого проводникового сплава E-AlMgSi (“алдрей”) (а) с 0.05 мас.% оловом (б) [14].

Истинная скорость окисления алюминиевого проводникового сплава E-AlMgSi (“алдрей”) в зависимости от температуры изменяется в пределах  $2.67 \cdot 10^{-4}$  до  $3.28 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1}$ . Кажущаяся энергия активации процесса окисления, вычисленная по тангенсу угла наклона прямой зависимости  $-\lg K - 1/T$ , составляет 128.5 кДж/моль (таблица 7).

Окисление алюминиевого проводникового сплава E-AlMgSi (“алдрей”), содержащего 0.05 мас.% олова, в твёрдом состоянии проводили при температурах 723К, 773К и 823К. Кинетические кривые окисления сплава

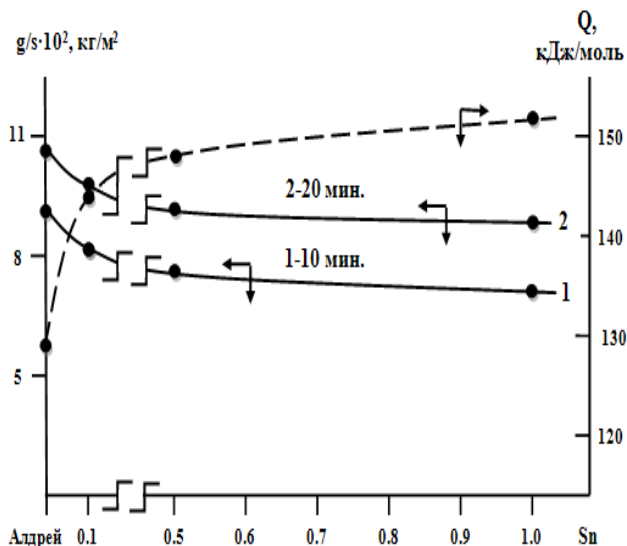
приведены на рисунке 6б. Скорость окисления сплава в зависимости от времени и температуры незначительно увеличивается. Однако рост величины удельной массы образца к 20 минутам приобретает постоянное значение равное  $3.21 \cdot 10^{-4}$  кг/м<sup>2</sup> при 823К. Кажущаяся энергия активации процесса окисления составляет 140.2 кДж/моль (таблица 7). Наблюдается медленное, но плавное нарастание толщины оксидной плёнки, которая при 20 минутах полностью предотвращает процесс окисления. По мере роста толщины оксидной плёнки скорость процесса окисления резко затормаживается, а с увеличением температуры растёт. При содержании 1.0 мас.% олова и температуре 723К скорость окисления составляет  $2.44 \cdot 10^{-4}$  кг·м<sup>-2</sup>·сек<sup>-1</sup>, при 823К увеличивается до  $3.66 \cdot 10^{-4}$  кг·м<sup>-2</sup>·сек<sup>-1</sup>, соответственно. Кажущаяся энергия активации при этом имеет величину 151.9 кДж/моль (таблица 7).

**Таблица 7** - Кинетические и энергетические параметры процесса окисления алюминиевого проводникового сплава E-AlMgSi (“алдрей”), легированного оловом, в твёрдом состоянии [14].

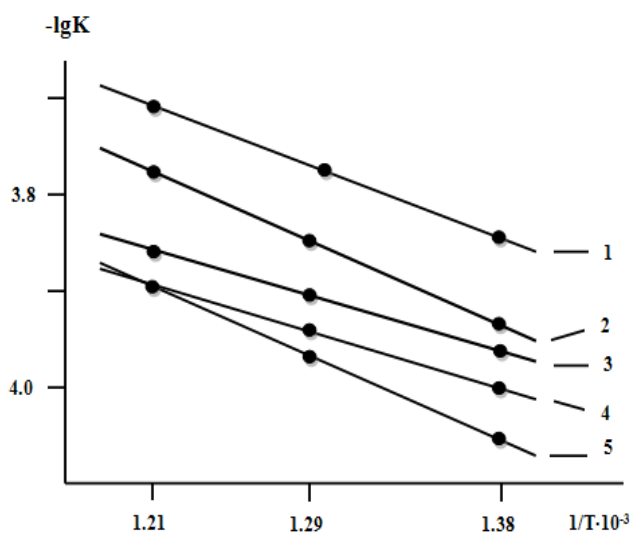
Содержание олова в сплаве, мас.%	Температура окисления, К	Истинная скорость окисления К·10 <sup>4</sup> , кг·м <sup>-2</sup> ·с <sup>-1</sup>	Кажущаяся энергия активации, кДж/моль
0.0	723	2.67	128.5
	773	2.89	
	823	3.28	
0.05	723	2.59	140.2
	773	2.81	
	823	3.21	
0.1	723	2.54	144.0
	773	2.74	
	823	3.15	
0.5	723	2.49	148.1
	773	2.68	
	823	3.08	
1.0	723	2.44	151.9
	773	2.63	
	823	3.66	

Добавки олова в количестве 0.05 мас.% незначительно влияют на окисляемость алюминиевого проводникового сплава E-AlMgSi (“алдрей”). Дальнейшее увеличение концентрации олова повышает окисляемость исходного проводникового сплава E-AlMgSi (“алдрей”) (рисунок 4).

Приведённая на рисунке 5 зависимость  $-\lg K - 1/T$  для алюминиевого проводникового сплава E-AlMgSi (“алдрей”), легированного оловом показывает, что процесс окисления с ростом температуры увеличивается.

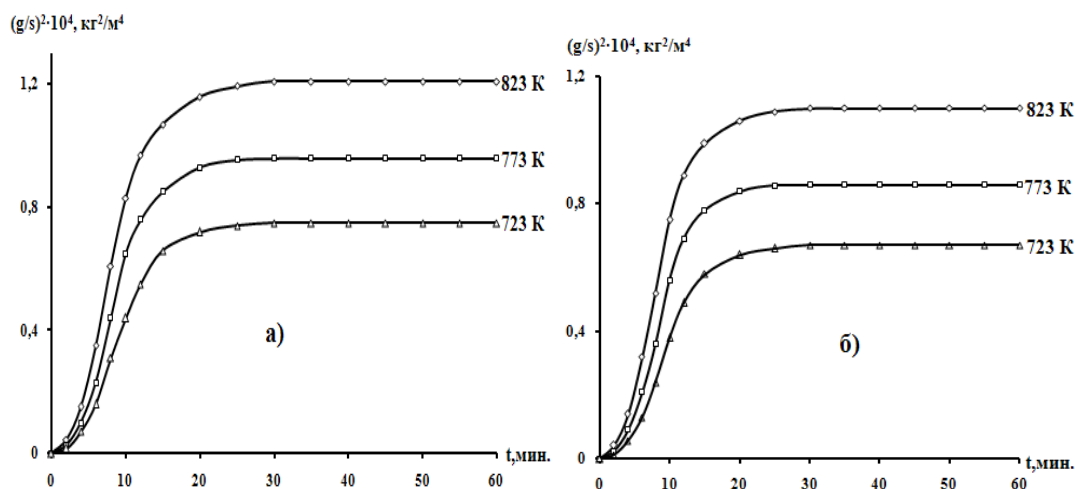


**Рисунок 4** – Изохронны окисления алюминиевого проводникового сплава E-AlMgSi (“алдрей”), легированного оловом при 823 К [14].



**Рисунок 5** – Зависимость  $-\lg K$  от  $1/T$  для алюминиевого проводникового сплава E-AlMgSi (“алдрей”) (1), легированного оловом, мас. %: 0.05(2); 0.1(3); 0.5(4); 1.0(5) [14].

Следует заключить, что характер окисления сплавов подчиняется гиперболической зависимости (рисунок б).



**Рисунок 6** – Квадратические кинетические кривые окисления алюминиевого проводникового сплава E-AlMgSi (“алдрей”) (а) с 0.05(б) мас. % оловом [14].



В таблице 8 приведены результаты обработки квадратичных кинетических кривых окисления в виде зависимости  $(g/s)^2$ - $\tau$  для алюминиевого проводникового сплава E-AlMgSi (“алдрей”), содержащего от 0.05 до 1.0 мас.% олова. Видно, что квадратичные кривые окисления сплавов подчиняются общему уравнению  $y=k^n$ , где значение  $n=1\div 4$ , т.е. описываются уравнением гиперболы.

**Таблица 8** – Полиномы квадратичных кинетических кривых окисления алюминиевого проводникового сплава E-AlMgSi (“алдрей”), легированного оловом, в твёрдом состоянии [14].

Содержание олова в сплаве, мас.%	Температура окисления, К	Полиномы квадратичных кинетических кривых окисления сплавов	Коэффициент регрессии R
0.0	723	$y = -0,6 \cdot 10^{-5}x^4 + 0,001x^3 - 0,044x^2 + 0,973x$	0,981
	773	$y = -0,6 \cdot 10^{-5}x^4 + 0,001x^3 - 0,038x^2 + 1,109x$	0,988
	823	$y = -0,6 \cdot 10^{-8}x^4 + 0,002x^3 - 0,041x^2 + 1,289x$	0,994
0.05	723	$y = -0,5 \cdot 10^{-1}x^4 - 0,001x^3 - 0,016x^2 + 0,766x$	0,992
	773	$y = -0,6 \cdot 10^{-6}x^4 + 0,001x^3 - 0,032x^2 + 1,005x$	0,993
	823	$y = -0,6 \cdot 10^{-7}x^4 + 0,001x^3 - 0,055x^2 + 1,284x$	0,994
0.1	723	$y = -0,5 \cdot 10^{-2}x^4 - 0,001x^3 - 0,009x^2 + 0,663x$	0,992
	773	$y = -0,5 \cdot 10^{-1}x^4 - 0,002x^3 - 0,021x^2 + 0,874x$	0,990
	823	$y = -0,6 \cdot 10^{-6}x^4 + 0,003x^3 - 0,051x^2 + 1,205x$	0,995
0.5	723	$y = -0,5 \cdot 10^{-2}x^4 - 0,001x^3 - 0,002x^2 + 0,569x$	0,991
	773	$y = -0,5 \cdot 10^{-1}x^4 - 0,002x^3 - 0,021x^2 + 0,830x$	0,992
	823	$y = -0,6 \cdot 10^{-4}x^4 + 0,003x^3 - 0,045x^2 + 1,118x$	0,995
1.0	723	$y = -0,5 \cdot 10^{-1}x^4 - 0,001x^3 - 0,004x^2 + 0,536x$	0,992
	773	$y = -0,2 \cdot 10^{-1}x^4 - 0,002x^3 - 0,019x^2 + 0,767x$	0,993
	823	$y = -0,6 \cdot 10^{-1}x^4 + 0,003x^3 - 0,039x^2 + 1,024x$	0,995

В таблице 9 обобщены величины кажущейся энергии активации процесса окисления алюминиевого проводникового сплава E-AlMgSi (“алдрей”), легированного оловом, свинцом и висмутом, различной концентрации. Среди легирующих элементов наибольшее значение кажущейся энергии активации имеют сплавы с оловом.

**Таблица 9** – Зависимость кажущейся энергии активации процесса окисления алюминиевого проводникового сплава E-AlMgSi (“алдрей”), легированного оловом, свинцом и висмутом, в твердом состоянии [11, 14].

Легированный компонент и его содержание в сплаве, мас. %	0,0	0,05	0,1	0,5	1,0
Олова	128,5	140.2	144.0	148.1	151.9
Свинец		136.1	139.5	143.2	148.0
Висмут		130.0	134.6	139.9	145.1

На основании проведенных исследований кинетики окисления алюминиевого проводникового сплава E-AlMgSi (“алдрей”), легированного оловом, свинцом и висмутом, в твердом состоянии установлены следующие закономерности изменения кинетических и энергетических характеристик процесса окисления:

1. Установлено, что окисление сплавов подчиняется гиперболическому закону с истинной скоростью окисления порядка  $10^{-4}$  кг·м<sup>-2</sup>·сек<sup>-1</sup>.
2. Выявлено, что самые минимальные значения скорости окисления имеет сплав E-AlMgSi (“алдрей”) с оловом, а максимальные – относятся к сплавам, легированного висмутом.

#### **ГЛАВА 4. АНОДНОЕ ПОВЕДЕНИЕ АЛЮМИНИЕВОГО ПРОВОДНИКОВОГО СПЛАВА E-AlMgSi (“алдрей”), ЛЕГИРОВАННОГО ОЛОВОМ, СВИНЦОМ И ВИСМУТОМ, В СРЕДЕ ЭЛЕКТРОЛИТА NaCl**

Для изучения электрохимических свойств четырех компонентных сплавов применяли следующий метод исследования. Электрохимические испытания образцов проводили потенциостатическим методом в потенциодинамическом режиме на потенциостате ПИ-50-1.1 со скоростью развёртки потенциала 2 мВ/с, в среде электролита NaCl. Электродом сравнения служил хлоридсеребряный, вспомогательным - платиновый. Образцы потенциодинамически поляризовали в положительном направлении от потенциала, установившегося при погружении, до резкого возрастания тока в результате питингообразования. Затем образцы поляризовали в обратном направлении и по пересечению кривых определяли величину потенциала репассивации. Далее шли в катодную область до значения потенциала -1,3В для удаления оксидных плёнок с поверхности электрода в результате подщелачивания при электродной поверхности. Наконец, образцы поляризовали вновь в положительном направлении и из анодной кривой определяли основные электрохимические параметры.

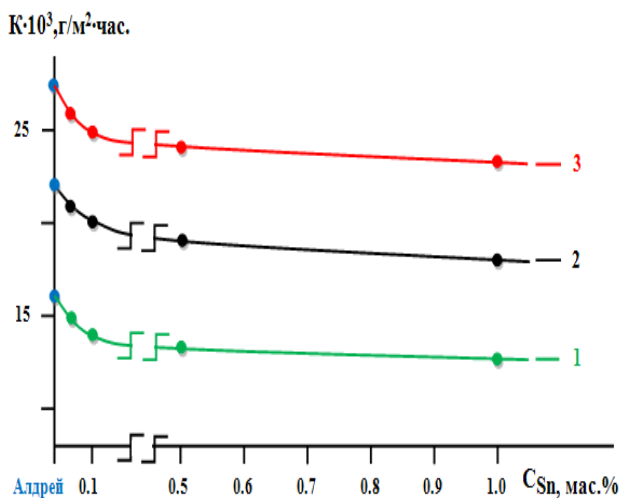
На полученных, таким образом, поляризационных кривых определяли основные электрохимические характеристики сплавов: потенциал

питтингообразования ( $E_{п.о.}$ ), потенциал и ток коррозии ( $E_{кор.}$  и  $i_{кор.}$ ). Потенциал репассивации ( $E_{р.п.}$ ), определялось 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  $\beta_k = 0,12$  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

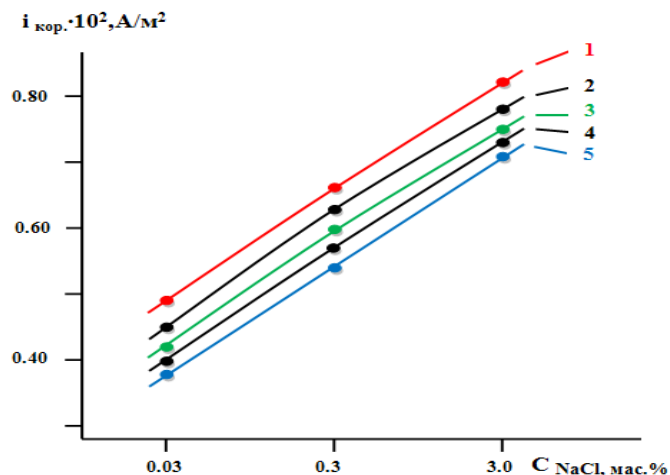
$$K = i_{кор.} \cdot k,$$

где  $k = 0.335$  г/А · час электрохимический эквивалент алюминия.

Зависимость скорости коррозии алюминиевого сплава E-AlMgSi (“алдрей”) от содержания олова, в среде электролита 0.03, 0.3 и 3.0%-ного NaCl приведён на рисунке 7. Добавки олова к сплаву E-AlMgSi (“алдрей”) уменьшает скорость его коррозии во всех исследованных средах электролита NaCl. При этом рост концентрации электролита NaCl способствует увеличению скорости коррозии сплавов (рисунок 8). 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.



**Рисунок 7** - Зависимость скорости коррозии алюминиевого проводникового сплава E-AlMgSi (“алдрей”) от концентрации олова, в среде электролита 0,03%(1); 0,3%(2) и 3,0%-ного(3) NaCl [2, 9, 14].

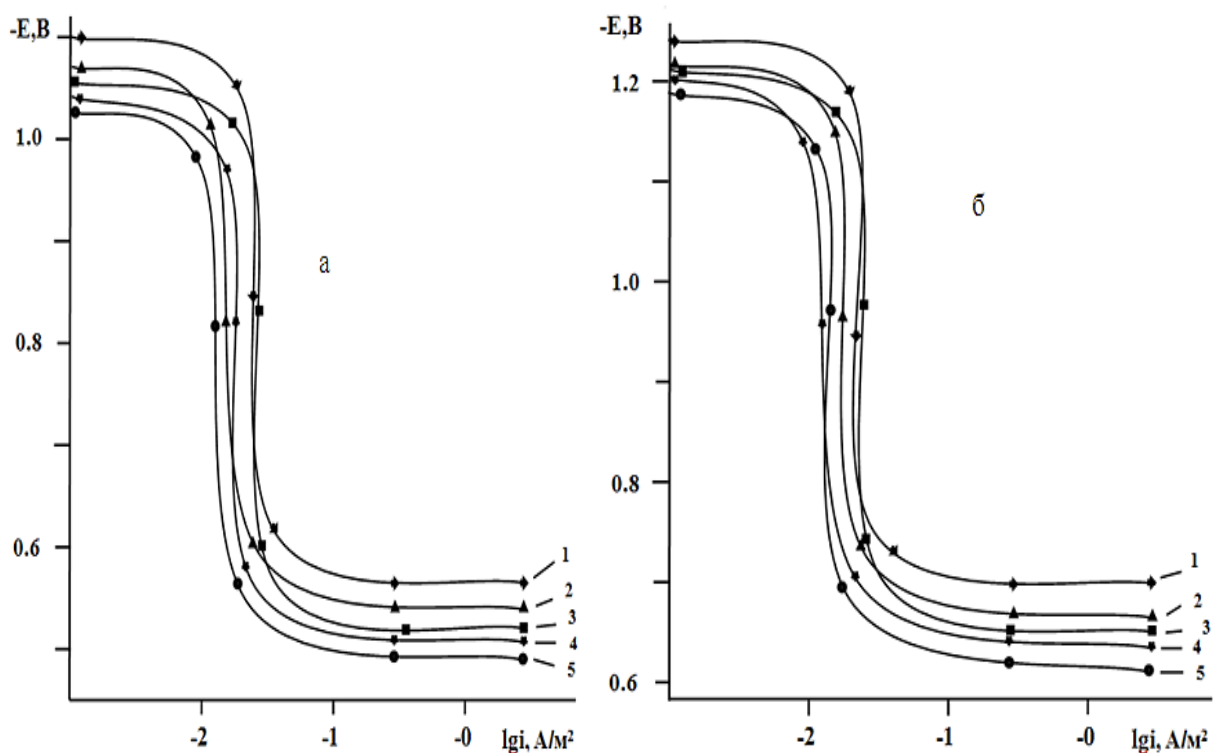


**Рисунок 8** - Зависимость плотности тока коррозии алюминиевого проводникового сплава E-AlMgSi (“алдрей”) (1), содержащего олова, мас.‰: 0.5(2); 0.1(3); 0.5(4); 1.0(5) от концентрации NaCl. [2, 9, 14].

**Таблица 10** - Коррозионно-электрохимические характеристики алюминиевого проводникового сплава E-AlMgSi (“алдрей”) с оловом, в среде электролита NaCl [2, 9, 14].

Среда NaCl, мас. %	Содержание олова в сплаве, мас. %	Электрохимические потенциалы, В (х.с.э.)				Скорость коррозии	
		-E <sub>св.кор.</sub>	-E <sub>кор.</sub>	-E <sub>п.о.</sub>	-E <sub>рп.</sub>	i <sub>кор.</sub> · 10 <sup>2</sup> , А/м <sup>2</sup>	K · 10 <sup>3</sup> , г/м <sup>2</sup> ·час
0.03	-	0,860	1,100	0,600	0,720	0,049	16,41
	0.05	0,844	1,077	0,589	0,707	0,045	15,07
	0.1	0,838	1,058	0,578	0,701	0,042	14,07
	0.5	0,827	1,047	0,570	0,698	0,040	13,40
	1.0	0,817	1,038	0,557	0,698	0,038	12,73
0.3	-	0,890	1,180	0,680	0,768	0,066	22,11
	0.05	0,870	1,158	0,654	0,750	0,063	21,10
	0.1	0,862	1,140	0,640	0,750	0,060	20,10
	0.5	0,850	1,127	0,632	0,745	0,057	19,09
	1.0	0,842	1,110	0,626	0,742	0,054	18,09
3.0	-	0,919	1,240	0,735	0,800	0,082	27,47
	0.05	0,902	1,218	0,712	0,774	0,078	26,13
	0.1	0,894	1,210	0,704	0,770	0,075	25,12
	0.5	0,886	1,202	0,698	0,765	0,073	24,45
	1.0	0,879	1,194	0,690	0,758	0,071	23,78

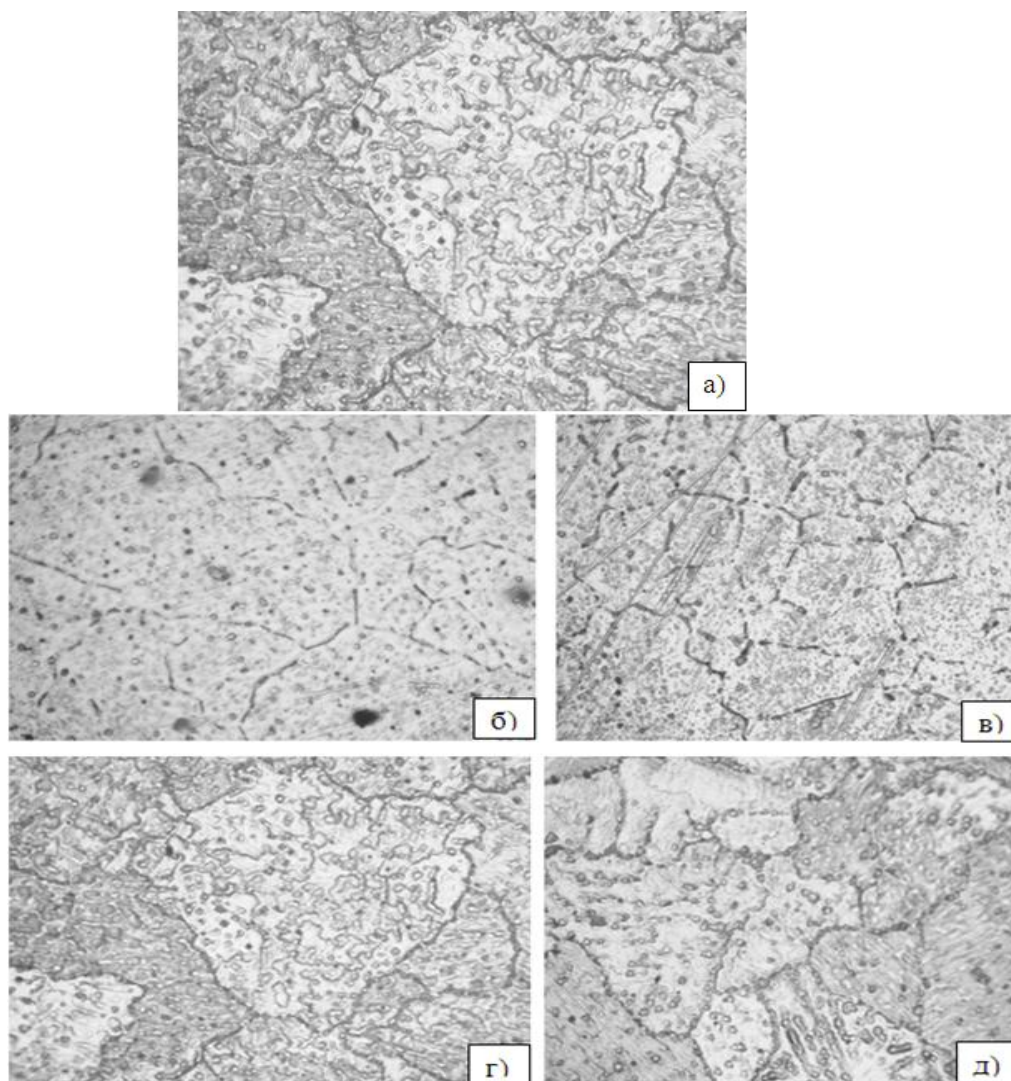
Результаты коррозионно-электрохимических исследований алюминиевого проводникового сплава E-AlMgSi (“алдрей”) с оловом, в среде электролита NaCl представлены в таблице 10 и на рисунках 7-9. Приведённые данные, свидетельствуют о том, что добавки олова от 0.05 до 1.0 мас. % к исходному сплаву E-AlMgSi (“алдрей”) в исследуемых средах сдвигают потенциалы коррозии, репассивации и питтингообразования в положительную область значений и одновременно с этим повышается стойкость сплавов к питтинговой коррозии.



**Рисунок 9** - Анодные поляризационные (2мВ/с) кривые алюминиевого проводникового сплава E-AlMgSi (“алдрей”) (1), содержащего олова, мас.‰: 0.5(2), 0.1(3), 0.5(4), 1.0(5), в среде электролита 0.03% (а) и 3% - ного (б) NaCl [2, 9, 14].

Анодные ветви поляризационных кривых сплава E-AlMgSi (“алдрей”) с олова, приведены на рисунке 9. Как видно из хода кривых, с повышением содержания 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. Как видно из рис. 10г,д в микроструктуре сплава E- (“алдрей”), содержащего 0,5 и 1,0 мас.‰ олова не наблюдается первичные выделения фазы  $Mg_2Si$ . Фаза  $Mg_2Si$  у исходного сплава (рис. 10а) и малолегированных оловом сплавов кристаллизуется в игольчатой форме на фоне твердого раствора алюминия (рис. 10б).



**Рисунок 10** - Микроструктуры (x650) алюминиевого сплава E-AlMgSi (“алдрей”) (а), легированного оловом, мас. %: 0.05(б), 0.1(в), 0.5(г) и 1.0(д). [10].

В таблицах 11 и 12 представлены обобщенные результаты исследования анодного поведения сплавов систем E-AlMgSi –Sn (Pb, Bi). Потенциал коррозии сплава E-AlMgSi (“алдрей”) с ростом концентрации олова, свинца и висмута смещается в положительном направлении оси ординат. При переходе от слабого электролита к сильному электролиту наблюдается уменьшение величины потенциала свободной коррозии независимо от содержания легирующего компонента. Так, с увеличением концентрации хлорид-иона потенциал свободной коррозии исходного сплава E-AlMgSi (“алдрей”), уменьшается от -0.860 В, в среде 0.03 % NaCl до - 0.919 В, в среде 3 %- ного NaCl. Рост концентрации легирующего компонента способствует увеличению величины потенциалов питтингообразования и репассивации во всех средах независимо от концентрации хлорид-иона. Установленные зависимости характерны для алюминиевого сплава E-AlMgSi (“алдрей”), легированного оловом, свинцом и висмутом. При переходе от сплавов с оловом к сплавам со

свинцом и висмутом потенциалы свободной коррозии и питтингообразования растут (таблица 11).

**Таблица 11** – Потенциалы (х.с.э.) свободной коррозии ( $-E_{\text{св.кор.}}$ , В) и питтингообразования ( $-E_{\text{п.о.}}$ , В) алюминиевого проводникового сплава E-AlMgSi (“алдрей”), с оловом, свинцом и висмутом в среде электролита NaCl [2, 3, 9, 12, 15].

Среда NaCl, мас. %	Содержание Sn, Pb и Bi в сплаве, мас. %	Сплавы с оловом		Сплавы со свинцом		Сплавы с висмутом	
		$-E_{\text{св.кор.}}$	$-E_{\text{п.о.}}$	$-E_{\text{св.кор.}}$	$-E_{\text{п.о.}}$	$-E_{\text{св.кор.}}$	$-E_{\text{п.о.}}$
0.03	-	0,860	0,600	0,860	0,600	0,860	0,600
	0.05	0,844	0,589	0,828	0,578	0,818	0,555
	0.1	0,838	0,578	0,819	0,567	0,806	0,540
	0.5	0,827	0,570	0,810	0,549	0,795	0,528
	1.0	0,817	0,557	0,800	0,538	0,783	0,517
0.3	-	0,890	0,680	0,890	0,680	0,890	0,680
	0.05	0,870	0,654	0,858	0,640	0,844	0,627
	0.1	0,862	0,640	0,849	0,631	0,835	0,619
	0.5	0,850	0,632	0,840	0,620	0,826	0,608
	1.0	0,842	0,626	0,830	0,612	0,816	0,596
3.0	-	0,919	0,735	0,919	0,735	0,919	0,735
	0.05	0,902	0,712	0,882	0,700	0,872	0,689
	0.1	0,894	0,704	0,873	0,690	0,863	0,673
	0.5	0,886	0,698	0,865	0,682	0,865	0,659
	1.0	0,879	0,690	0,854	0,670	0,844	0,647

С ростом концентрации хлорид-иона увеличивается плотность тока коррозии и соответственно, скорость коррозии алюминиевого сплава E-AlMgSi (“алдрей”), легированного оловом, свинцом и висмутом. Данная зависимость характерна для всех сплавов независимо от их состава и особенностей физико-химических свойств легирующего компонента. Наблюдается снижение скорости коррозии при переходе от сплавов с оловом к сплавам со свинцом. Для сплава E-AlMgSi (“алдрей”) также характерен рост скорости коррозии с увеличением концентрации хлорид-иона в электролите (таблица 12).

Таким образом, установлено, что анодная устойчивость повышается на 30-40%, при легировании оловом, свинцом и висмутом до 1.0 мас.% алюминиевого проводникового сплава E-AlMgSi (“алдрей”), в среде электролита NaCl.

**Таблица 12** - Зависимость плотности тока коррозии и скорости коррозии алюминиевого проводникового сплава E-AlMgSi (“алдрей”) с оловом, свинцом и висмутом в среде электролита NaCl [2, 3, 9, 12, 15].

Среда NaCl, мас. %	Содержание Sn, Pb и Bi в сплаве, мас. %	Скорость коррозии					
		сплавов с Sn		сплавов со Pb		сплавов с Bi	
		$i_{\text{корр.}} \cdot 10^2, \text{ А/м}^2$	$K \cdot 10^3, \text{ г/м}^2 \cdot \text{ч}$	$i_{\text{корр.}} \cdot 10^2, \text{ А/м}^2$	$K \cdot 10^3, \text{ г/м}^2 \cdot \text{ч}$	$i_{\text{корр.}} \cdot 10^2, \text{ А/м}^2$	$K \cdot 10^3, \text{ г/м}^2 \cdot \text{ч}$
0.03	-	0,049	16,41	0,049	16,41	0,049	16,41
	0.05	0,045	15,07	0,042	14,07	0,041	13,73
	0.1	0,042	14,07	0,039	13,06	0,038	12,73
	0.5	0,040	13,40	0,037	12,39	0,035	11,72
	1.0	0,038	12,73	0,034	11,39	0,032	10,72
0.3	-	0,066	22,11	0,066	22,11	0,066	22,11
	0.05	0,063	21,10	0,060	20,10	0,058	19,43
	0.1	0,060	20,10	0,057	19,09	0,055	18,42
	0.5	0,057	19,09	0,054	18,09	0,052	17,42
	1.0	0,054	18,09	0,051	17,08	0,049	16,41
3.0	-	0,082	27,47	0,082	27,47	0,082	27,47
	0.05	0,078	26,13	0,074	24,79	0,072	24,12
	0.1	0,075	25,12	0,072	24,12	0,069	23,11
	0.5	0,073	24,45	0,070	23,45	0,067	22,45
	1.0	0,071	23,78	0,067	22,44	0,065	21,75

## ВЫВОДЫ

1. В режиме «охлаждения» исследована температурная зависимость теплоемкости алюминиевого проводникового сплава (“алдрей”) с оловом, свинцом и висмутом. Показано, что с ростом концентрации легирующего компонента и температуры теплоемкость сплавов увеличивается. При переходе от сплавов с оловом к сплавам со свинцом и висмутом величина теплоемкости и коэффициент теплоотдачи сплавов уменьшаются.

2. Исследованиями температурных зависимостей изменений термодинамических функций проводникового алюминиевого сплава E-AlMgSi (“алдрей”) с добавками Sn, Pb и Bi определено, что в ряду Sn → Pb → Bi происходит снижение таких термодинамических характеристик, как энтальпия и энтропия. При увеличении температуры величины энтальпии и энтропии сплава E-AlMgSi (“алдрей”) возрастают, при этом для энергии Гиббса отмечена обратная зависимость – ее величины снижается. Такие тенденции в изменениях величин теплоемкости и термодинамических характеристик для проводникового сплава на основе алюминия E-AlMgSi (“алдрей”) с добавками Sn, Pb и Bi объясняются увеличением гетерогенности структуры рассматриваемого сплава при его легировании оловом, свинцом и висмутом.



3. Термогравиметрическим методом исследована кинетика процесса окисления проводникового алюминиевого сплава E-AlMgSi (“алдрей”), легированного добавками Sn, Pb и Bi. Выявлены следующие закономерности, согласно которым происходит изменение энергетических и кинетических характеристик процесса окисления данного сплава, а именно: окисление исследуемых сплавов E-AlMgSi (“алдрей”) протекает согласно гиперболического закона, а скорость окисления сплавов имеет порядок  $10^{-4}$  кг·м<sup>-2</sup>·сек<sup>-1</sup>; максимальные энергии активации имеют сплавы с добавками олова, затем в ряду Sn → Pb → Bi происходит снижение величины энергии.

4. Установлено потенциостатическим методом с использованием потенциодинамического режима увеличение на 85-90% коррозионной стойкости проводникового сплава на основе алюминия E-AlMgSi (“алдрей”) при легировании его добавками Sn, Pb и Bi в количестве до 1,0 мас. В данном случае для исходного сплава величины коррозионных потенциалов, а также потенциалов репассивации и питтингообразования увеличиваются и сдвигаются в более положительные области величин. Переход от сплавов с Sn к сплавам со Pb и Bi характеризуется уменьшением скорости коррозии (для сплавов с 1,0 мас% добавки). Установлен рост скорости коррозии сплавов от концентрации электролита NaCl. При этом наблюдается сдвиг основных электролитических потенциалов сплавов в область отрицательных значений.

5. Установленные физико-химические закономерности алюминиевого сплава E-AlMgSi (“алдрей”) явились основой, для разработки состава новых сплавов которые, защищены 4-мя малыми патентами Республики Таджикистан - № TJ 1058 от 14.02.2020 г.; № TJ 1059 от 14.02.2020 г.; № TJ 1099 от 24.06.2020 г. и № TJ 1220 от 14.12.2021 г.

6. Разработанные составы новых алюминиевых проводниковых сплавов прошли опытно-промышленные испытания в ООО «Нокил ТалКо» (Акт испытания от 15.01.2020 г.) в качестве проводников электрического тока. Экономический эффект за счёт утончения сечения проводов на 10% с учётом роста их механических свойств на 1000 т продукции составил 200 тыс. \$ США.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ:**

#### **Статьи, опубликованные в научных журналах, рекомендованных ВАК Министерства высшего образования и науки Российской Федерации**

1. И.Н. Ганиев. Влияние добавок висмута на теплофизические и термодинамические свойства алюминиевого проводникового сплава E-AlMgSi (“алдрей”) **А.П. Абдулаков**, Дж.Х. Джайлоев, У.Ш. Якубов, А.М. Сафаров, В.Д. Абулхаев // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2020. Т. 23. № 1. С. 86-93(Scopus).

I.N. Ganiev. Naclinfluence of bismuth additives on the thermophysical and thermodynamic properties of aluminum conductive alloy E-AlMgSi (“aldrey”) / **A.P. Abdulakov**, J.H. Jayloev, U.Sh. Yakubov, A.M. Safarov, V.J. Abdulkhaev // Electronic Materials. 2020. T. 23. № 1. С. 127-132 (**Scopus**).

2. И.Н. Ганиев. Коррозионно-электрохимическое поведение алюминиевого проводникового сплава E-AlMgSi (“алдрей”) с оловом, в среде электролита NaCl / **А.П. Абдулаков**, Дж.Х. Джайлоев, Ф.А. Алиев, А.Р. Рашидов // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2019. Т. 22. № 2. С. 128-134(**Scopus**).

I.N. Ganiev. Corrosion and electrochemical behavior of aluminum conductor E-AlMgSi (“aldrey”) alloy with tin in a medium electrolite NaCl **A.P. Abdulakov**, J.H. Jayloev, F.A. Aliev, A.R. Rashidov // Modern Electronic Materials. 2019. T. 22. № 2. С. 111-116 (**Scopus**).

3. И.Н. Ганиев. Влияние добавок свинца на анодное поведение проводникового алюминиевого сплава E-AlMgSi («алдрей») в среде электролита NaCl / **А.П. Абдулаков**, 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.

4. **А.П. Абдулаков**. Влияние добавок олова на теплофизические свойства алюминиевого проводникового сплава E-AlMgSi (“алдрей”) / Вестник Бохтарского государственного университета им. Н. Хусрава. Серия естественных наук. - 2021. - №2/3(90). - С.44-48.

#### **Изобретения по теме диссертации**

5. Малый патент Республики Таджикистан № ТЈ 1058. Алюминиевый проводниковый сплав / И.Н. Ганиев, **А.П. Абдулаков**, Дж.Х. Джайлоев, У.Ш. Якубов, Н.И. Ганиева, Ф.А. Алиев, А.Р. Рашидов, Ё.Дж. Холов / Приоритет изобретения от 02.05.2019 (дата госрегистрации 14.02.2020).

6. Малый патент Республики Таджикистан № ТЈ 1059. Алюминиевый проводниковый сплав / И.Н. Ганиев, Ф.А. Алиев, **А.П. Абдулаков**, А.М. Сафаров, А.Р. Рашидов, Ё.Дж. Холов, Ф.С. Давлатзода / Приоритет изобретения от 25.07.2019 (дата госрегистрации 14.02.2020).

7. Малый патент Республики Таджикистан № ТЈ 1099. Алюминиевый проводниковый сплав / И.Н. Ганиев, **А.П. Абдулаков**, Дж.Х. Джайлоев, У.Ш. Якубов, Н.И. Ганиева, Ф.А. Алиев, А.Р. Рашидов, Ё.Дж. Холов / Приоритет изобретения от 12.03.2020 (дата госрегистрации 24.06.2020).

8. Малый патент Республики Таджикистан № ТЈ 1220. Алюминиевый проводниковый сплав / И.Н. Ганиев, А.М. Сафаров, Ё.Дж. Холов, Ф.А. Алиев, Дж.Х. Джайлоев, У.Ш. Якубов, А.Р. Рашидов, Ф.С. Давлатзода, **А.П. Абдулаков** / Приоритет изобретения от 12.03.2021 (дата госрегистрации 14.12.2021).

**Статьи, опубликованные в материалах международных и республиканских конференций:**

9. **А.П. Абдулаков.** Анодное поведение проводникового алюминиевого сплава E-AlMgSi (алдрей) с оловом, в среде электролита 0.03%-ного NaCl / И.Н. Ганиев, Ф.А. Алиев, Ё.Дж. Холов, А.Р. Рашидов // Мат. Респ. научно-прак. конф. «Актуальные проблемы индустриализации Республики Таджикистан: проблемы и стратегии». Част 1. ТУТ. г. Душанбе. -2019. -С. 11-15.

10. И.Н. Ганиев. Изучение микроструктуры алюминиевого проводникового сплава E-AlMgSi (“алдрей”) с оловом / **А.П. Абдулаков**, Дж.Х. Джайлоев, С.С. Раджабалиев, К.Р. Исмоилов // Мат. Респ. научной конф. «Инновационное развитие науки». ГНУ «Центр исследования инновационных технологий» при НАНТ, г. Душанбе, 2020.- С. 31-33.

11. **А.П. Абдулаков.** Кинетика окисления алюминиевого проводникового сплава E-AlMgSi (“алдрей”), легированного свинцом, в твёрдом состоянии / И.Н. Ганиев, Дж.Х. Джайлоев, Н.И. Ганиева // Мат. Межд. научно-практ. конф. «Развитие энергетики и возможности».- ИЭТ, г. Бохтар, 2020.- С. 377-379.

12. **А.П. Абдулаков.** Анодное поведение алюминиевого проводникового сплава E-AlMgSi (“алдрей”) с висмутом, в среде электролита 3%-ного NaCl / И.Н. Ганиев, Дж.Х. Джайлоев, Н.И. Ганиева // Мат. Межд. научно-практ. конф. «Индустриально-инновационное развитие экономики РТ: состояние, проблемы и перспективы».- МИСиС, г. Душанбе, 2020.- С. 182-185.

13. **А.П. Абдулаков.** Коэффициент теплоотдачи алюминиевого проводникового сплава E-AlMgSi (“алдрей”) с висмутом / И.Н. Ганиев, Дж.Х. Джайлоев, Н.И. Ганиева //Мат. Респ. научно-прак. конф. «Актуальные вопросы естественных наук и технологий», посвящённая 20-летию изучения и развития естественных, точных и математических наук. -Душанбе: РТСУ, 2020. –С.13-15.

14. **А.П. Абдулаков.** Кинетика окисления алюминиевого проводникового сплава E-AlMgSi (“алдрей”), легированного оловом, в твёрдом состоянии / И.Н. Ганиев, Дж.Х. Джайлоев, Ф.А. Алиев, А.М. Сафаров // Мат. Респ. научно-прак. конф. «Развитие энергетической отрасли в Республике Таджикистан». - Душанбе: ТК ТТУ, 2021. –С.60-64.

15. И.Н. Ганиев. Анодное поведение алюминиевого проводникового сплава E-AlMgSi (“алдрей”) с висмутом, в среде электролита 0,3%-ного NaCl / **А.П. Абдулаков**, Дж.Х. Джайлоев, Н.И. Ганиева, А.М. Сафаров, Ё.Дж. Холов // Мат. Респ. научно-теор. конф. «Проблемы современной химии и состояния ее внедрения в учебный процесс». - Дангара: ДГУ, 2022. –С.182-184.