

На правах рукописи

ЭМОМОВ Исмоил Абдумаликович

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА AlBe-1 С МАГНИЕМ,
ЦИНКОМ И КАДМИЕМ**

2.6.17 – Материаловедение (технические науки)

**АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

ДУШАНБЕ -2026

Работа выполнена в лаборатории «Коррозионностойкие материалы» Института химии им. В. И. Никитина НАН Таджикистана

Научный руководитель: кандидат химических наук, доцент, заведующая кафедрой «Методики преподавания химии» Таджикского национального университета
Курбонова Мукадас Завайдовна

Официальные оппоненты: **Саидзода Масрур Мирзохон** – доктор технических наук, доцент кафедры «Естественных наук» Худжанского филиала Международного университета туризма и предпринимательства Таджикистана

Амонова Азиза Валиевна - кандидат химических наук, доцент кафедры «Технология химических производств» Таджикского технического университета им. М.С. Осими.

Ведущая организация: Таджикский государственный педагогический университет им. С. Айни, кафедра «Общая и неорганическая химия»

Защита состоится «06» апреля **2026 г.** в 11-00 часов на заседании Диссертационного совета 73.1.002.02 ГНУ «Институт химии им В.И. Никитина Национальной академии наук Таджикистана» по адресу: 734063, 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.chemistri.tj

Автореферат разослан « _____ » _____ 2026 года

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат химических наук, доцент

Халикова Л.Р.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность данной темы. Одним из основных путей значительного увеличения срока службы металлических конструкционных материалов является совершенствование методов и средств борьбы с коррозией, снижение экономических потерь от коррозии, выбор оптимального содержания компонентов сплава. Улучшение и совершенствование свойств сплавов может стать основанием для расширения функционала аппаратов и техники.

Сплавы алюминия являются востребованными материалами в высокотехнологичных отраслях — от авиастроения и радиоэлектроники до электротехники, приборостроения и производства бытовой техники. Материалы на основе алюминия характеризуются целым рядом полезных свойств, что обуславливает их востребованность в науке и промышленности и делают их использование выгодным и целесообразным. Основные из них это: низкая плотность, хорошие показатели электропроводности и теплопроводности, устойчивость различным видам коррозии и т.д.

Для того чтобы добиться улучшенных свойств сплавов, последнее время активно используются методы легирования алюминиевых сплавов малыми количествами других металлов. При добавлении малого количества металла, основной металл меняет свои свойства, таким образом можно получить сплавы устойчивые к коррозии, способные функционировать в агрессивных средах и сложных условиях.

Основываясь на приведенной выше информации, нами было решено провести научно-практические исследования с алюминий-бериллиевым сплавом AlBe-1, а именно, добавить определенные количества цветных металлов Mg, Zn и Cd и определить произошедшие изменения в микроструктуре, в механических свойствах, в физико-химических и теплоэнергетических свойствах. Подтверждением актуальности является то, что спрос на улучшение различных свойств алюминиевых сплавов в последние годы увеличивается и наши исследования и полученные данные могут определить влияние добавок и как результат, способствовать получению сплавов с улучшенными характеристиками.

Цель исследования заключается в установлении термодинамических закономерностей, кинетики окисления и электрохимических свойств алюминий-бериллиевого сплава AlBe-1 с магнием, цинком и кадмием и разработки новых сплавов на их основе.

Для реализации цели исследования были сформулированы следующие задачи:

1. Исследовать теплоёмкость и температурные изменения термодинамических функций сплава AlBe-1, легированного магнием, цинком и кадмием.

2. Установить механизм твердофазного окисления и исследовать кинетические особенности процесса окисления сплава AlBe-1, легированного металлами Mg, Zn, Cd.

3. Установить воздействие каждого из добавок (Mg, Zn, Cd) на коррозионно-электрохимический характер алюминиевого сплава AlBe-1, в среде электролита хлорида натрия.

4. Основываясь на полученных результатах, среди синтезированных сплавов выявить сплав с определенным составом, который показывает лучшие свойства.

Объекты исследования. Алюминиево-бериллиевый сплав AlBe-1, легированный металлами Mg, Zn, Cd для изучения их изменения в свойствах.

Предмет исследования. Исследование малых добавок цинка, кадмия и магния на различные физико-химические, механические и теплофизические свойства сплава AlBe-1 полученного на основе технических сортов алюминия.

Методы исследования. В ходе текущих исследований были использованы следующие методы: метод определения теплоемкости в режиме «охлаждения», потенциостатический метод изучения электрохимической коррозии, термогравиметрический метод, металлографический метод, ИК-спектроскопический, рентгенофазовый метод определения состава и другие методы.

С помощью пакета программ Microsoft Excel, Sigma Plot, были обработаны и посчитаны полученные результаты и нарисованы кривые.

Этапы исследования.

Диссертационное исследование было выполнено в период 2016-2025 гг.

по следующим этапам:

-изучение и анализ литературных сведений по алюминиевого сплава, с добавками магния, цинка и кадмия;

-разработка способов и оптимальных условий синтеза сплавов алюминия

с бериллием и переходных элементов;

-определение состава и исследование теплоемкости, кинетики окисления синтезированных сплавов алюминия и элементами подгруппы магния;

-проведение системного анализа и установление закономерности изменения анодных характеристик исследуемых сплавов в различных средах электролитов;

-исследование микроструктуры и рентгенофазовый анализ продуктов при окислении указанных сплавов.

Информационная база исследования.

Информационной базой настоящей диссертации являются научные

труды – патенты, монографии, диссертации, периодические научные журналы, материалы симпозиумов, конференций и интернет портал, посвящённых алюминиевым сплавам (глубина поиска более 30-40 лет).

Степень достоверности результатов данного исследования обусловлена отсутствием противоречий известным положениям наук: металлургической, физической химии, материаловедения. Экспериментальные результаты согласуются с известными данными по предметам исследования и с результатами исследования других ученых по данному направлению. Результаты получены при использовании сертифицированных общепризнанных методик исследования и анализа, что гарантирует воспроизводимость экспериментальных данных. Для обеспечения высокой точности измерений и исключения влияния внешних факторов, все опыты выполнялись на высокоточных стандартизированных оборудовании, предварительно прошедших калибровку в соответствии с требованиями.

Научная новизна работы заключается в следующем:

– определены особенности изменения теплоёмкости, энтальпии, энтропии и энергии Гиббса от содержания легирующих добавок (Mg, Zn и Cd), а также в зависимости от температуры;

– исследованы механизмы и кинетика твердофазного окисления сплава AlBe-1 с добавками Mg, Zn и Cd. Установлены зависимости интенсивности газовой коррозии от состава сплава и температуры рабочей среды. Определены наиболее эффективные концентрации легирующих элементов, среди всех синтезированных сплавов;

– показано, что образование оксидных слоёв на поверхности образцов из алюминиево-бериллиевых сплавов, определяется как температурным режимом, так и концентрацией отдельных элементов в составе сплава;

– исследовано влияние легирующих добавок магния, цинка и кадмия на электрохимическую коррозионную стойкость сплава AlBe-1. Определены составы сплавов из числа разработанных, которые демонстрируют повышенную устойчивость к химической и электрохимической коррозии. Установлены закономерности изменения скорости электрохимической коррозии в зависимости от химического состава сплавов и концентрации хлорид-ионов в исследуемой среде.

Теоретические основы исследования.

Исследование охватывает теоретические положения, объясняющие, влияние структурных особенностей материалов на кинетические и энергетические параметры окисления, а также на температурное поведение теплоёмкости и соответствующих термодинамических функций. Проведён анализ коррозионно-электрохимических свойств алюминиевого сплава AlBe-1, легированного Mg, Zn и Cd. Показано, что устойчивость материала к коррозии определяется как содержанием легирующих металлов, так и составом или агрессивностью используемой электролитической среды NaCl.

Практическая ценность проведённого исследования заключается в определении оптимального состава синтезированного на основе сплава AlBe-1, легированного металлами Mg, Zn и Cd, которые характеризуются устойчивостью к окислению при высокой температуре, устойчивостью к электрохимической коррозии и имеющими улучшенные показатели механических свойств, что делает его перспективным для применения в современной технике.

Установлены кинетические и энергетические характеристики процесса высокотемпературного окисления трёхкомпонентных сплавов в твёрдом состоянии. Идентифицированы фазовые составы окисных продуктов, а также определена их роль в формировании механизма окисления при повышенных температурах.

Анализ показал, что легирование малыми добавками Mg, Zn и Cd оказывает влияние на формирование микроструктуры, что обуславливает соответствующее изменение свойств сплава. Установлена зависимость анодных характеристик сплава от природы и содержания легирующих компонентов, при исследовании в нейтральной среде (NaCl), при различных значениях pH среды.

Проведённые научные исследования и полученные по их результатам итоги стали основой для получения малого патента Республики Таджикистан (TJ №1276 от 04.02.2022 года).

Основные положения и результаты, выносимые на защиту:

– результаты проведённых исследований по определению температурной зависимости теплоёмкости, а также изменений термодинамических характеристик сплава AlBe-1, легированного металлами Mg, Zn, Cd;

– определённые в результате исследований кинетические и термодинамические параметры твердофазного, высокотемпературного окисления сплава AlBe-1, легированного металлами Mg, Zn, Cd. Структурно-фазовый анализ образовавшихся оксидных плёнок и установлена их функциональная роль в развитии механизма окисления;

– влияние добавок Mg, Zn, Cd на коррозионно-электрохимические характеристики сплава AlBe-1, а также влияние концентрации хлорид

ионов в жидкой исследовательской среде на скорость коррозии синтезированных сплавов;

-состав среди синтезированных сплавов, характеризующийся наилучшими свойствами и стойкостью к коррозионному разрушению при различных влияниях

Личный вклад автора заключается в проработке и анализе научнотехнической литературы по теме диссертационной работы, обосновании актуальности, постановке цели и задач, выбора методов исследований, планировании и выполнении экспериментов, анализе, обработке и систематизации результатов исследований.

Апробация результатов и публикации: Результаты проведённых исследований доложены и опубликованы в материалах различных международных и республиканских научных симпозиумах, конференциях и семинарах: VII international scientific-practical conference «International forum: Problems and scientific solutions», (Melbourne, Australia, 2021); IV межд. научн. конф. «Вопросы физической и координационной химии» (Душанбе, 2019); межд. науч.–практ. конф. «Preceding the international symposium on innovative development of science» Research center of innovative technologies NAST (Dushanbe, Tajikistan, 2020); науч.-практ. конф. «Применение инновационных технологий в преподавании естественных дисциплин в средних общеобразовательных школах и высших учебных заведениях», посвящённой 150-летию ПТХЭ Д.И. Менделеева (Душанбе, 2019); I-ой межд. науч.–практ. конф. «Перспективы развития исследований в области химии координационных соединений и аспекты их применений» (Душанбе, 2022); межд. научно – прак. конф. на тему «Использование современных методов обучения в образовательных учреждениях: проблемы и перспективы» посвящ. «2020-2040 годы «Двадцатилетия изучения естественных, точных и математических наук в сфере науки и образования», «65-летию химического факультета ТНУ» и «55-летию кафедры методики преподавания химии химического факультета ТНУ» (Душанбе, 2023); VI межд. науч. конф.: «Вопросы физической и координационной химии», посвящ. «Двадцатилетию изучения и развития естественных, точных и математических наук в сфере науки и образования» (2020-2040 годы), 90-летию д.х.н., профессора Якубова Х.М. и памяти д.х.н., профессора Юсуфова З.Н, 75-летию и 53-летию научно-педагогической деятельности д.х.н., профессора Рахимовой М. (Душанбе, 2024); межд. научно-практ. конф. посвящ. «Реализации стратегии развития точных и математических наук на 2020-2040 годы и государственной целевой программы развития математических, естественных и естественных наук на 2021-2025 годы» и в честь дня таджикской науки под названием «Технологии и инновации в реализации стратегии развития науки и

технологий» (вклад развития математических, точных и естественных наук в развития промышленности и сферы сервиса) (Душанбе, 2025) и других.

По результатам проведённых научно-практических исследований опубликованы 15 работы, из них 5 статей в рецензируемых журналах, рекомендуемых ВАК Российской Федерации и 9 работ в материалах конференций различного уровня. Получен 1 малый патент Республики Таджикистан (ТЖ №1276 от 04.02.2022 года).

Объем и структура диссертационной работы. Диссертация включает в себя введение, четыре главы, выводы и списка научной литературы, состоящей из 195 наименований, а также приложений. Общий объем работы составляет 169 страниц, включая 49 рисунков и 39 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

В первой главе представлен обзор литературных данных в области физико-химические свойства алюминиевых сплавов с магнием, цинком и кадмием. На основе выполненного обзора показано, что теплофизические и термодинамические свойства, кинетика окисления, анодное поведение алюминиево-бериллиевых сплавов с другими металлами хорошо изучены, но свойства алюминиево-бериллиевых сплавов с щелочными металлами (Mg, Zn) и Cd не изучены, т.е. для данной группы сплавов имеются лишь скурые отрывочные сведения.

Глава II. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АЛЮМИНИЕВО-БЕРИЛЛИЕВОГО СПЛАВА AlBe-1 С МАГНИЕМ, ЦИНКОМ И КАДМИЕМ

В технике изучение микроструктуры является одним из главных средств исследования алюминиевых сплавов. Это дает возможность определять влияние различных деформационных и термических обработок на свойства готовой алюминиевой продукции, а также анализировать причины ее брака.

Исследования микроструктуры и твердости алюминиево-бериллиевого сплава (AlBe-1), легированного магнием, цинком и кадмием позволяют точно определить протяженность границы гомогенных и гетерогенных областей, а также наличие интерметаллидных фаз в сплавах. Микроструктуру сплава AlBe-1, легированного магнием, цинком и кадмием по методу Бринелля исследовали на световом микроскопе марки БИОМЕД-1 (Украина).

Микроструктура сплава AlBe-1, легированного магнием, цинком и кадмием представляет собой твердый раствор алюминия с включениями эвтектики, количество и размер которой зависит от содержания легирующего элемента в сплаве. Сплавы с относительно малыми (0.05%) добавками магния, цинка и кадмием характеризуются довольно крупнозернистой структурой. Дальнейшее повышение содержания легирующего компонента измельчает микроструктуру алюминиевого сплава AlBe-1 и она становится однородной и мелкозернистой как это показано на рисунок 1.

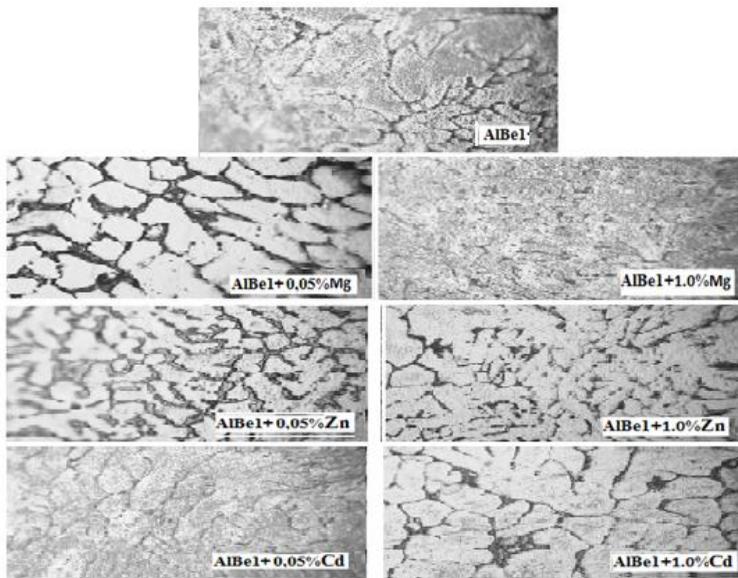


Рисунок 1 - Микроструктуры (x500) алюминиевого сплава AlBe-1, легированного магнием, цинком и кадмием

В результате проведенных исследований установлено, что микроструктура алюминиевого сплава AlBe-1 однотипная и состоит из твердого раствора алюминия с магнием, цинком и кадмием, и включениями эвтектики. Также наблюдаются частицы интерметаллических фаз, образовавшихся в процессе первичной кристаллизации сплавов. Повышение концентрации легирующего компонента в сплаве AlBe-1 измельчает структуру, и она становится однородной и мелкозернистой. Количество и размер частиц второй фазы в конечном итоге влияют на механические свойства исходного сплава AlBe-1.

Твердость и прочность алюминиевого сплава AlBe1 с ростом концентрации магния, цинка и кадмия увеличиваются. Сплавы,

содержащие магний и кадмий, характеризуются более высоким уровнем твердости и прочности.

Определение теплоемкость сплавов. Теплофизические и механические свойства сплавов на основе алюминия как теплоемкость, линейное расширение, плотность, теплопроводность, температуропроводность являются важнейшими физическими характеристиками, определяющими закономерности поведения этих материалов при различных внешних воздействиях.

Измерение теплоемкости сплавов в режиме «охлаждения» производилось на установке, в основу работы которой положен метод С-калориметра с тепломером и адиабатической оболочкой.

Для измерения удельной теплоёмкости металлов применяли закон охлаждения Ньютона - Рихмана. Любой предмет, имея температуру выше окружающей среды, охлаждается и скорость его охлаждения зависит от коэффициента теплоотдачи и величины теплоёмкости тела.

При сравнении кривых охлаждения двух металлических стержней определенной формы (температуры, как функции времени), из которых один является эталоном (известны его скорость охлаждения и теплоёмкость), можно рассчитать теплоёмкость другого стержня при расчёте скорости его охлаждения.

Теряемое ранее разогретым телом массой m при его охлаждении на dT градусов количество теплоты δQ , рассчитано по формуле

$$\delta Q = C_p^0 m dT \quad (1)$$

где C_p^0 – удельная теплоёмкость вещества, из которого состоит тело.

Количество теплоты δQ_s будет пропорционально разности температур тела T и окружающей среды T_0 , площади поверхности S и времени

$$\delta Q_s = -\alpha(T - T_0) \cdot S dt. \quad (2)$$

Если тело выделяет тепло так, что температура всех его точек изменяется одинаково, то будет справедливо равенство

$$\delta Q = \delta Q_s \text{ и } C_p^0 m dT = -\alpha(T - T_0) \cdot S dt. \quad (3)$$

Выражение (3) можно представить в виде

$$C_p^0 m \frac{dT}{dt} = -\alpha(T - T_0) S. \quad (4)$$

Полагая, что C_p^0 , α , T и T_0 в малых интервалах температур не зависят от координат точек поверхности образца, разогретых до равной температуры окружающей среды, для двух образцов соотношение (4) будет следующим

$$C_{p_1}^0 m_1 s_1 \alpha_1 \left(\frac{dT}{dt} \right)_1 = C_{p_2}^0 m_2 s_2 \alpha_2 \left(\frac{dT}{dt} \right)_2. \quad (5)$$

Применение данного равенства для двух образцов, один из которых является эталоном, имеющих равные состояния поверхностей и размеры ($S_1=S_2$), предполагает, что их коэффициенты теплоотдачи будут равны $\alpha_1=\alpha_2$ и выражаться уравнением

$$C_{p_1}^0 m_1 \left(\frac{dT}{dt} \right)_1 = C_{p_2}^0 m_2 \left(\frac{dT}{dt} \right)_2 \quad (6)$$

Из этого уравнения, зная удельную теплоёмкость $C_{p_1}^0$, скорости охлаждения эталона $\left(\frac{dT}{dt} \right)_1$ и измеряемого образца $\left(\frac{dT}{dt} \right)_2$ и массы образцов m_1 и m_2 , можно рассчитать теплоёмкость неизвестного вещества $C_{p_2}^0$

$$C_{p_2}^0 = C_{p_1}^0 \cdot \frac{m_1}{m_2} \cdot \frac{\left(\frac{dT}{dt} \right)_1}{\left(\frac{dT}{dt} \right)_2}, \quad (7)$$

Для оправданности такого допущения экспериментально были установлены зависимости температуры образцов от времени охлаждения для алюминия и меди. Полученные значения теплоемкости хорошо согласуются с литературными данными. Температурный диапазон измерения - до 800 К. Относительная ошибка измерения температуры в интервале от 300 до 700 К составляла $\pm 1\%$. Погрешность измерения теплоемкости по данной методике не превышает 6%.

В рамках данной работы исследовано влияние магния, цинка и кадмия на теплоемкость и изменений термодинамических функций алюминиево- бериллиевого сплава AlBe-1.

Сплавы для исследования получали в шахтных лабораторных печах сопротивления типа СШОЛ в интервале температур 750 – 800⁰С из Al – марки А7 (ГОСТ 11069-2001), Be– марки ХЧ (ГОСТ 4459-78), Mg– марки ХЧ (ГОСТ 4459-78), Zn– марки ХЧ (ГОСТ 4459-78), Cd– марки ХЧ (ГОСТ 4459-78).

Температурную зависимость теплоемкости алюминиевого сплава AlBe-1 с магнием, цинком и кадмием изучали в режиме «охлаждения» в интервале температур 300-700К. Полученные в ходе эксперимента кривые зависимости температуры от времени охлаждения образцов из алюминиевого сплава AlBe-1 с магнием, представлены на рисунке 1 и описываются уравнением вида

$$T = ae^{-b\tau} + pe^{-k\tau} \quad (8)$$

Дифференцируя уравнение (8) по τ , получаем уравнение для определения скорости охлаждения сплавов

$$dT / d\tau = -abe^{-b\tau} - pke^{-k\tau} \quad (9)$$

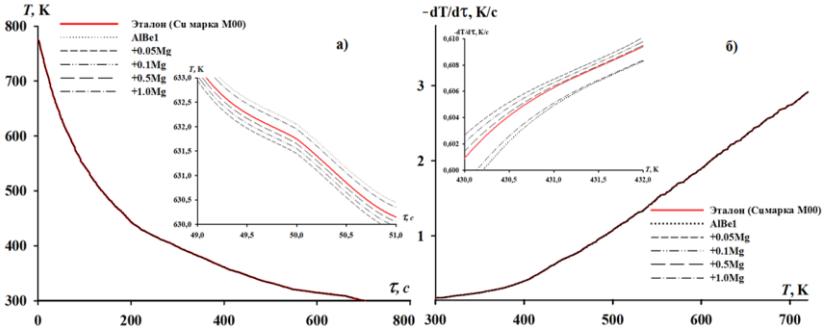


Рисунок 2 - Зависимость температуры (а) от времени и скорости охлаждения (б) от температуры для образцов из алюминиевого сплава AlBe-1 с магнием и эталона (Cu марки M00) от времени

По уравнению (9) нами рассчитаны скорости охлаждения образцов из алюминиевого сплава AlBe-1 с магнием и эталона, которые графически представлены на рисунке 2. Значения коэффициентов a , b , p , k , ab , pk в уравнении (9) для исследованных сплавов приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Значения коэффициентов в уравнении (9) для алюминиевого сплава AlBe-1 с магнием и эталона (Cu марки M00)

Содержание магния в сплаве, мас.%	a, K	$b \cdot 10^{-3}, c^{-1}$	p, K	$k \cdot 10^{-4}, c^{-1}$	$a \cdot b, K \cdot c^{-1}$	$pk \cdot 10^{-2}, K \cdot c^{-1}$
0.0	326.86	9.62	446.96	5.78	3.15	2.58
0.05	326.66	9.63	446.59	5.80	3.15	2.59
0.1	326.67	9.63	446.68	5.80	3.15	2.59
0.5	326.68	9.63	446.87	5.80	3.15	2.59
1.0	326.70	9.63	447.05	5.79	3.15	2.59
Эталон	326.,84	9.62	446.68	5.79	3.15	2.58

Далее используя рассчитанные значения величин скорости охлаждения образцов из сплавов, по уравнению (7) была вычислена удельная теплоёмкость алюминиевого сплава AlBe-1 с магнием и эталона (Cu марки M00). При этом использовалась программа SigmaPlot.

В таблице 2 представлены значения коэффициентов полиномов температурной зависимости удельной теплоёмкости образцов из алюминиевого сплава AlBe-1 с магнием, которые описывается уравнением вида

$$C_{P}^{0} = a + bT + cT^2 + dT^3. \quad (10)$$

Результаты расчёта температурной зависимости удельной теплоёмкости сплавов по формулам (7) и (10) представлены на рисунке 3(а). Как видно теплоемкость сплава AlBe-1 от температуры и концентрации магния увеличивается. Температурная зависимость коэффициента теплоотдачи для алюминиевого сплава AlBe-1 с магнием представлена на рисунке 3(б). Видно, что добавки магния и температура увеличивают коэффициент теплоотдачи исходного сплава.

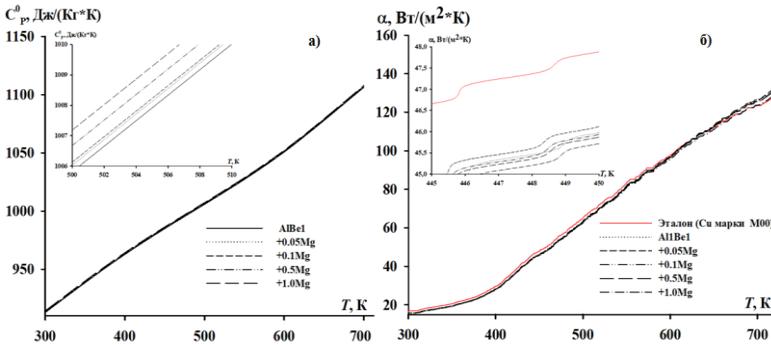


Рисунок 3 - Температурная зависимость удельной теплоемкости (а) и коэффициента теплоотдачи (б) алюминиевого сплава AlBe-1 с магнием и эталона (Cu марки М00)

Для расчёта температурной зависимости изменений энтальпии, энтропии и энергии Гиббса по уравнениям (11)-(13) были использованы интегралы от удельной теплоёмкости по уравнению (10):

$$[H^0(T) - H^0(T_0)] = a(T - T_0) + \frac{b}{2}(T^2 - T_0^2) + \frac{c}{3}(T^3 - T_0^3) + \frac{d}{4}(T^4 - T_0^4); \quad (11)$$

$$[S^0(T) - S^0(T_0)] = a \ln \frac{T}{T_0} + b(T - T_0) + \frac{c}{2}(T^2 - T_0^2) + \frac{d}{3}(T^3 - T_0^3); \quad (12)$$

$$[G^0(T) - G^0(T_0)] = [H^0(T) - H^0(T_0)] - T[S^0(T) - S^0(T_0)], \quad (13)$$

где $T_0 = 298.15 \text{ K}$.

Таблица 2 - Значения коэффициентов a , b , c , d в уравнении (10) для алюминиевого сплава AlBe-1 с магнием и эталона (Cu марки M00)

Содержание магния в сплаве, мас.%	a , Дж/(кг·К)	b , Дж/(кг·К ²)	$c \cdot 10^2$, Дж/(кг·К ³)	$d \cdot 10^5$, Дж/(кг·К ⁴)	Коэффициент корреляции, R ²
0.0	633.26	1.43	2.11	1.47	99.5
0.05	633.48	1.43	2.11	1.47	99.9
0.1	633.52	1.43	2.11	1.47	99.9
0.5	633.97	1.43	2.11	1.47	99.9
1.0	634.63	1.43	2.11	1.47	99.9
Эталон	324.45	0.27	0.028	0.142	1.00

Результаты расчёта температурной зависимости изменений термодинамических функций для алюминиевого сплава AlBe-1 с магнием и эталона (Cu марки M00) через 100 К представлены в таблице 3.

Таблица 3 - Температурная зависимость изменений термодинамических функций алюминиевого сплава AlBe-1 с магнием и эталона (Cu марки M00)

Содержание магния в сплаве, мас.%	$[H^0(T) - H^0(T_0^*)]$, кДж/кг для сплавов					
	Т.К					
	300	400	500	600	700	
0.0	1.6878	95.5632	194.0141	296.7896	404.5205	
0.05	1.6882	95.5853	194.0581	296.8553	404.608	
0.1	1.6883	95.5898	194.0669	296.8685	404.6256	
0.5	1.6891	95.6353	194.1571	297.0034	404.8051	
1.0	1.6903	95.7025	194.2901	297.2023	405.0699	
Эталон	0.7120	39.8685	80.1667	121.4190	163.5190	
	$[S^0(T) - S^0(T_0^*)]$, кДж/(кг·К) для сплавов					
	0.0	0.0056	0.2754	0.4949	0.6821	0.8481
	0.05	0.0056	0.2754	0.4949	0.6823	0.8483
	0.1	0.0056	0.2754	0.4950	0.6823	0.8483
	0.5	0.0056	0.2756	0.4952	0.6826	0.8487
	1.0	0.0057	0.2758	0.4956	0.6831	0.8493
	Эталон	0.0024	0.1149	0.2048	0.2800	0.3449
	$[G^0(T) - G^0(T_0^*)]$, кДж/кг для сплавов					
	0.0	-0.0052	-14.5817	-53.4216	-112.4880	-189.1410
	0.05	-0.0053	-14.5852	-53.4339	-112.5140	-189.1830
	0.1	-0.0053	-14.5858	-53.4364	-112.5190	-189.1920
	0.5	-0.0053	-14.5929	-53.4617	-112.5710	-189.2790
	1.0	-0.0053	-14.6032	-53.4990	-112.6490	-189.4080
Эталон	-0.0022	-6.1072	-22.2427	-46.58470	-77.9021	

* $T_0 = 298,15 \text{ K}$

Видно, что с ростом температуры энтальпия и энтропия сплавов увеличиваются, а значения энергии Гиббса уменьшается. Добавки магния в изученном концентрационном интервале (0.05-1.0 мас.%) незначительно увеличивает энтальпию и энтропию исходного сплава AlBe-1.

Указанные изменения термодинамических функций алюминиевого эвтектического сплава AlBe-1 при легировании его магнием связано с измельчением и ростом степени гетерогенности его структуры.

В таблицах 4, 5 обобщены результаты исследования теплоемкости и изменений термодинамических функций алюминиевых сплавов AlBe-1, на примере сплавов, содержащих 1,0 мас. % легирующего компонента (Mg, Zn, Cd). Видно, что значения теплоемкости, энтальпии и энтропии сплавов с ростом температуры увеличиваются, а величина энергии Гиббса уменьшается.

Таблица 4 - Температурная зависимость удельной теплоёмкости ((кДж/(кг·К)) алюминиевого сплава AlBe-1 с 1.0 мас.% магнием, цинк, кадмием и эталона (Cu марки M00)

Содержание металлов в сплаве, мас.%	T, K				
	300	400	500	600	700
0.0	912.83	962.78	1005.81	1050.74	1106.39
1.0% Mg	914.20	964.15	1007.18	1052.12	1107.76
1.0% Zn	907.85	957.79	1000.83	1045.76	1101.41
1.0% Cd	906.26	956.21	999.24	1044.17	1099.82
Эталон	384.98	397.66	408.00	416.86	425.10

В общем, удельная теплоёмкость и изменений термодинамических функции алюминиевого сплава AlBe-1 показали, что добавки магния, цинка и кадмия в изученном концентрационном интервале (0.05-1.0 мас.%) уменьшают теплоёмкость исходного алюминиевого сплава AlBe-1.

Следует отметить, что по мере перехода от сплавов с магнием к сплавам, легированными цинком и кадмием – удельная теплоёмкость уменьшается (таблица 4).

Установлено, что для алюминиевых сплавов AlBe1, легированного магнием, цинком и кадмием с ростом температуры теплоемкость, энтальпия и энтропия растут, а величины энергии Гиббса уменьшается (таблица 4, 5)

Таблица 5 - Зависимость энтальпии, энтропии и энергии Гиббса от температуры для алюминиевого сплава AlBe-1 с магнием, цинк, кадмием и эталона (Cu марки M00)

Содержание Mg, Zn, Cd в сплаве, мас. %	$[H^0(T) - H^0(T_0^*)]$, кДж/кг· для сплавов				
	Т, К				
	300	400	500	600	700
0.0	1.6878	95.5632	194.0141	296.7896	404.5205
1.0% Mg	1.6903	95.7025	194.2901	297.2023	405.0699
1.0% Zn	1.6785	95.0550	193.0070	295.2834	402.5154
1.0% Cd	1.6756	94.8941	192.6880	294.8065	401.8805
Эталон	0.7120	39.8675	80.1667	121.4190	163.5190
$[S^0(T) - S^0(T_0^*)]$, кДж/(кг·К) для сплавов					
0.0	0.0056	0.2754	0.4949	0.6821	0.8481
1.0% Mg	0.0057	0.2758	0.4956	0.6831	0.8493
1.0% Zn	0.0056	0.2739	0.4923	0.6786	0.8438
1.0% Cd	0.0056	0.2734	0.4915	0.6775	0.8425
Эталон	0.0024	0.1149	0.2048	0.2800	0.3449
$[G^0(T) - G^0(T_0^*)]$, кДж/кг· для сплавов					
0.0	-0.0052	-14.5817	-53.4216	-112.488	-189.141
1.0% Mg	-0.0052	-14.6032	-53.4990	-112.649	-189.408
1.0% Zn	-0.0052	-14.5034	-53.1389	-111.900	-188.165
1.0% Cd	-0.0052	-14.4786	-53.0493	-111.714	-187.856
Эталон	-0.0022	-6.1072	-22.2427	-46.5847	-77.9021

* $T_0 = 298,15 \text{ K}$

В целом, на основе выполненных экспериментальных исследований можно заключить, что полученные уравнения зависимостей теплоёмкости и изменений термодинамических функций (энтальпия, энтропия, энергия Гиббса) от температуры для эвтектического алюминиево-бериллиевого сплава AlBe-1 с магнием цинком и кадмием описывают свойства исследованных групп сплавов с точностью $R^2_{\text{корр.}} = 0.997 \div 0.999$.

ГЛАВА III. ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ОКИСЛЕНИЯ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА AlBe-1 С МАГНИЕМ, ЦИНКОМ И КАДМИЕМ

Процесс кинетику окисления алюминиевого сплава AlBe-1, легированного магнием, цинком и кадмием, в твердом состоянии

изучали термогравиметрическим методом. Окисление алюминиевого сплава AlBe-1 изучено на сплавах, содержащих: 0.01; 0.05; 0.1; 0.5; 1.0 мас.% магния. Состав сплавов исследовали качественным и количественным анализом. Кинетические и энергетические параметры процесса окисления сплавов приведены в таблице 6 и на рисунках 4-6.

Кинетические кривые окисления алюминиево-бериллиевого сплава AlBe-1 (а), легированного 0.05 (б); 0.5 (в); 1.0 (г) магнием при температурах 723, 773 и 823К приведены на рисунках 4. Как видно из них кривые окисления алюминиевого сплава AlBe-1 (а) и сплава с 0.05 мас.% магния (б) имеют степенной характер с интенсивной начальной скоростью окисления в первые 10 минут и с последующим замедлением процесса. Видно, что начальной стадии процесса окисления образующая оксидная плёнка не обладает достаточными защитными свойствами, чтобы затормаживать процесс окисления.

У алюминиевого сплава AlBe-1, легированного 0.05 мас.% магнием истинная скорость окисления при температуре 723К равно $3.68 \cdot 10^{-4}$ кг·м⁻²·с⁻¹ при температуре 773К составляет, $3.90 \cdot 10^{-4}$ кг·м⁻²·с⁻¹, и при температуре 823К равно $4.31 \cdot 10^{-4}$ кг·м⁻²·с⁻¹. Величина удельной массы образца к 20-30 минутам для данного сплава, приобретает постоянное значение около $14.0 \cdot 10^{-2}$ кг/м² при 823К. Из таблицы 6 видно, что кажущаяся энергия активации процесса окисления данного сплава составляет 116.2 кДж/моль.

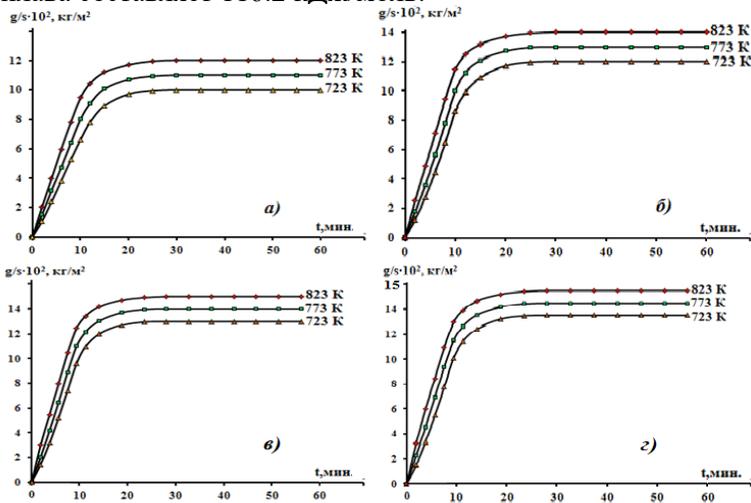


Рисунок 4 - Кинетические кривые окисления алюминиевого сплава AlBe-1 (а), легированного магнием, мас. %: 0.05 (б); 0.5 (в); 1.0 (г) при температурах 723, 773 и 823К

Некоторое увеличение истинной скорости окисления (рисунок 4 в, г) происходит при легировании алюминиевого сплава Al-Be1 0.5 и 1.0 мас.% магнием, а для сплава, содержащего 1.0 мас.% магния отмечено значительное уменьшение энергии активации окисления. Исследование показывает, что при этом энергия активации сплава, содержащего 0.1 мас.% магния, равняется 110.5 кДж/моль, а значение истинной скорости окисления при температурах 723К и 823К изменяется от $3.72 \cdot 10^{-4}$ до $4.35 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1}$ (табл. 6).

Приведена математическая обработка кинетических кривых окисления алюминиевого сплава AlBe-1, легированного магнием, в твёрдом состоянии. Кривые окисления подчиняются уравнению $y = KX^n$ в котором n меняется от 2 до 4 в зависимости от состава окисляемого сплава. Судя по нелинейной зависимости $(g/s)^2-t$, следует заключить, что характер окисления сплавов подчиняется гиперболической зависимости.

Приведенная на рисунке 5 зависимость $-\lg K-1/T$ и изохронны окисления сплавов для алюминиевого сплава AlBe-1, легированного магнием, показывают, что процесс окисления при вышеуказанных температурах с ростом содержания магния в сплаве AlBe-1 растёт.

С увеличением температуры наблюдается рост скорости окисления. Рост окисления при исследованных температурах с увеличением концентрации магния растёт. Это хорошо видно из изохронны окисления алюминиевого сплава AlBe-1 с магнием при 723 К и 823К (рис. 6)

Таблица 6 - Кинетические и энергетические параметры процесса окисления алюминиевого сплава AlBe-1 с магнием, в твердом состоянии

Содержание магния в сплаве, мас.%	Температура окисления, К	Истинная скорость окисления, $K \cdot 10^4, \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	Кажущаяся энергия активации, кДж/моль
0.0	723	3.67	118.5
	773	3.89	
	823	4.28	
0.05	723	3.68	116.2
	773	3.90	
	823	4.31	
0.1	723	3.72	110.5
	773	3.94	
	823	4.35	
0.5	723	3.81	104.3
	773	3.98	
	823	4.39	
1.0	723	3.85	96.0
	773	4.03	
	823	4.44	

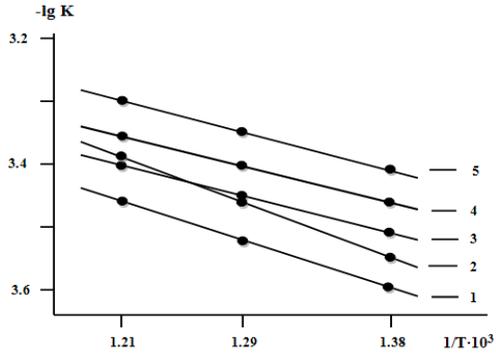


Рисунок 5 - Зависимость $-\lg K$ от $1/T$ для алюминиевого сплавов AlBe-1 (1), легированного магнием, мас. %: 0.05(2); 0.1(3); 0.5(4); 1.0(5)

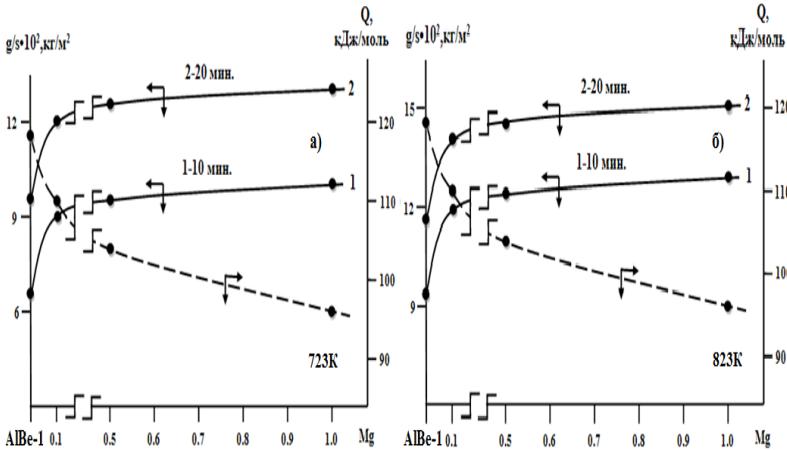


Рисунок 6 - Изохронны окисления алюминиевого сплава AlBe-1 с магнием при 723 К (а) и 823К (б)

Таким же образом была исследована кинетика окисления алюминиевого сплава AlBe-1 с цинком и кадмием. Результаты исследования приведены в таблице 7. Видно, что при переходе от сплавов с магнием к сплавам с цинком и кадмием, в соответствии со свойствами переходных металлов в пределах подгруппы, окисление сплавов растёт, о чём свидетельствует уменьшение величины кажущейся энергии активации окисления сплавов.

В сплавах с высоким содержанием магния, цинка и кадмия (1.0 мас.%) обнаружены полосы поглощения, относящиеся к оксидам легирующих металлов: BeO (75-1543 см⁻³), AlO (75-278 см⁻³), Al₂O₃ (75-782 см⁻³), Al_{21.333}O₃₂, MgO (75-1525 см⁻³) и более сложного состава Al₂MgO₄ (73-559 см⁻³), MgAl₂O₄ (75-1803 см⁻³) и гидроксидов Al(OH)₃, ZnO (75-1526 см⁻³), Al_{2.667}O₄ (80-1385 см⁻³), Zn_{2.66}O (74-534 см⁻³), Cd (1-1178 см⁻³), CdO (5-640 см⁻³), CdO₂, Cd_{1.44}Al_{10.88}O_{17.23}.

В целом, при экспериментальном исследовании кинетики окисления алюминиевого сплава AlBe-1, легированного магнием, цинком и кадмием установлено, что самые минимальные значения скорости окисления относятся к сплаву AlBe-1 с магнием, а минимальные к сплавам с кадмием. Алюминиево-бериллиевый сплав AlBe-1, легированный цинком занимает промежуточное положение. Показано, что легирующие компоненты повышают окисляемость исходного алюминиевого сплава AlBe-1.

Таким образом, алюминиевый сплав AlBe-1, легированный магнием цинком и кадмием рекомендуется для изготовления изделий, эксплуатирующийся при низких температурах.

ГЛАВА IV. ВЛИЯНИЕ МАГНИЯ, ЦИНКА И КАДМИЯ НА АНОДНОЕ ПОВЕДЕНИЕ АЛЮМИНЕВО-БЕРИЛЛИЕВОГО СПЛАВА AlBe-1, В СРЕДЕ ЭЛЕКТРОЛИТА NaCl

В данном разделе представлены результаты исследования анодного поведения алюминиевого сплава AlBe-1, легированного магнием, цинком и кадмием, в среде электролита 0.03, 0.3 и 3.0%-ного NaCl.

Исследования проводили в потенциодинамическом режиме на потенциостате ПИ-50-1.1 со скоростью развёртки потенциала 2 мВ/с, с программатором ПР-8 и самозаписью на ЛКД-4.

Электродом сравнения служил хлорид – серебряный, а вспомогательным – платиновый. По ходу прохождения полной поляризационной кривой определяли следующие электрохимические параметры: E_{ст} или E_{св.кор} – стационарный потенциал или потенциал свободной коррозии; E_{реп} – потенциал репассивации; E_{п.о.} – потенциал питтингообразования (или потенциал пробоя) после катодной поляризации; E_{кор} – потенциал коррозии; i_{кор.} – ток коррозии. Расчет тока коррозии, как основной электрохимической характеристики процесса коррозии, проводился по катодной кривой с учетом тафеловской константы v_к = 0.12В. Скорость коррозии (К) определяли по формуле $K = i_{кор} \cdot k$, где i_{кор.} – плотность тока коррозии, а k = 0.335 г/А час для алюминия.

Для электрохимических исследований образцы потенциодинамически поляризовали в положительном направлении от

потенциала, установившегося при погружении, до резкого возрастания тока в результате питтингообразования (рис. 8, кривая I). Затем образцы поляризовали в обратном направлении (рис. 8, кривая II) и по пересечению кривых I и II определяли величину потенциала репассивации. Далее шли в катодную область до значения потенциала -1,2В для удаления оксидной плёнки с поверхности электрода (рис. 8, кривая III) в результате подщелачивания приэлектродной поверхности. Наконец, образцы поляризовали вновь в положительном направлении и из анодных кривых определяли основные электрохимические параметры сплавов (рис. 8, кривая IV).

Скорость коррозии сплавов, содержащих 0.01-0.5 % магния, цинка и кадмия почти на 30 % меньше, чем у исходного сплава (табл. 8). Добавки легирующих компонента способствуют снижению скорости анодной коррозии, о чём свидетельствует смещение анодных кривых сплавов в более положительную область потенциалов (рис. 9). При этом по мере увеличения концентрации хлорид – иона в электролите NaCl скорость коррозии сплавов увеличивается независимо от содержания легирующего компонента.

Применительно к настоящим исследованиям следует отметить, что в целом с ростом концентрации хлорид – иона в 10 (0.03% и 0.30% NaCl) и 100 (0.03% и 3.0% NaCl) раз потенциал питтингообразования алюминиевых сплавов с магнием, кадмием и цинком смещается в отрицательную область значений (табл. 9).

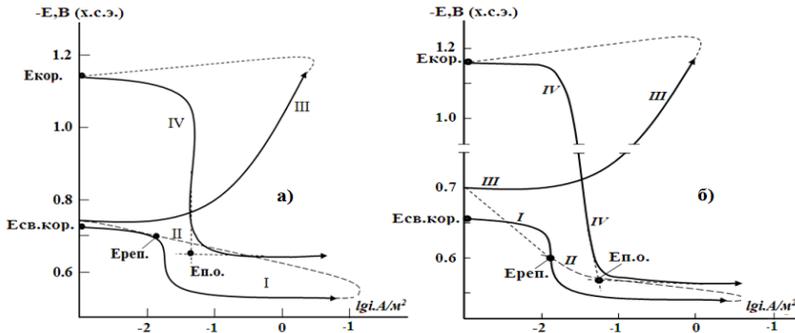


Рисунок 8 - Полная поляризационная (2мВ/с) кривая алюминиевого сплава AlBe-1 (а) и легированных 1.0 мас.% магнием (б), в среде электролита 3%-ного NaCl: Есв.кор. – потенциал свободной коррозии, Еп.о. – потенциал питтингообразования, Ер.р. – потенциал репассивации

Исследования показывают, что добавки магния, цинка и кадмия в пределах 0.01-0.5 мас.% способствуют смещению потенциала свободной коррозии в положительную область во всех исследованных

средах электролита NaCl. Независимо от содержания магния происходит смещение потенциалов коррозии, питтингообразования и репассивации в положительную область, при этом по мере ростом концентрации хлорид – иона в электролите NaCl а скорость коррозии сплавов увеличивается (табл. 8).

Видно, что добавки магния до 1.0 мас.% способствуют смещению потенциалов свободной коррозии, питтингообразования и репассивации в положительную область, а при повышении концентрации хлорид-иона в электролите NaCl в отрицательном направлении.

Обобщённые результаты исследования анодного поведения алюминиевого сплава AlBe-1, легированного магнием, цинком и кадмием представлены в таблицах 8 и 9. Потенциал свободной коррозии алюминиевых сплавов с ростом концентрации металлов изменяется в положительном направлении оси ординат. С увеличением концентрации хлорид – иона потенциал свободной коррозии сплавов уменьшается (табл. 8).

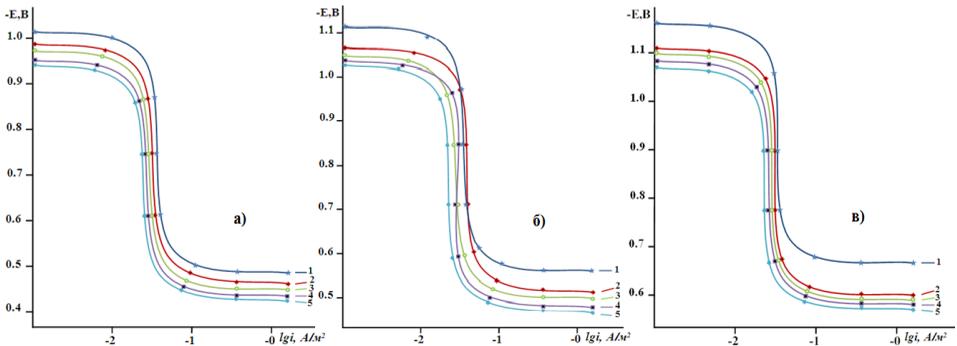


Рисунок 9 - Потенциодинамические анодные поляризационные (2мВ/с) кривые алюминиевого сплава AlBe-1(1), легированного магнием, мас.‰: 0.05(2); 0.1(3); 0.5(4); 1.0(5), в среде электролита 0.03 (а), 0.3 (б) и 3.0 (в) %- ного NaCl

С увеличением концентрации Mg, Zn и Cd в сплаве AlBe-1 во всех средах, независимо от концентрации хлорид-иона, наблюдается рост величины потенциалов питтингообразования и репассивации. Установленные зависимости характерны для алюминиевого сплава AlBe-1 со всеми исследованными металлами. При переходе от алюминиевых сплавов с магнием к сплавам с цинком потенциалы, которой свободной коррозии и питтингообразования растут, т.е. изменяются в положительном направлении оси ординат (табл. 8).

Таблица 8 - Потенциалы (х.с.э.) свободной коррозии (-Е_{св.кор.}, В) и питтингообразования (-Е_{п.о.}, В) алюминиевого сплава А1Ве-1 с магнием, цинком и кадмием, в среде электролита NaCl

Среда NaCl, мас.%	Содержание металлов в сплаве, мас.%	Сплавы с Mg		Сплавы с Zn		Сплавы с Cd	
		-Е _{св.кор.}	-Е _{п.о.}	-Е _{св.кор.}	-Е _{п.о.}	-Е _{св.кор.}	-Е _{п.о.}
0.03	0.0	0.560	0.490	0.560	0.490	0.560	0.490
	0.05	0.549	0.465	0.480	0.447	0.455	0.437
	0.1	0.538	0.450	0.460	0.436	0.442	0.425
	0.5	0.528	0.436	0.448	0.425	0.425	0.416
	1.0	0.519	0.425	0.435	0.415	0.410	0.405
0.30	0.0	0.600	0.560	0.600	0.560	0.600	0.560
	0.05	0.570	0.516	0.555	0.492	0.530	0.480
	0.1	0.560	0.500	0.540	0.480	0.520	0.468
	0.5	0.549	0.485	0.525	0.466	0.510	0.457
	1.0	0.540	0.470	0.510	0.455	0.500	0.450
3.00	0.0	0.728	0.670	0.728	0.670	0.728	0.670
	0.05	0.690	0.614	0.664	0.590	0.642	0.581
	0.1	0.678	0.600	0.647	0.580	0.628	0.569
	0.5	0.667	0.582	0.633	0.570	0.612	0.560
	1.0	0.656	0.570	0.618	0.561	0.600	0.550

Таблица 9 – Зависимость скорости коррозии алюминиевого сплава А1Ве-1 с магнием, цинком и кадмием, в среде электролита NaCl

Среда NaCl, мас.%	Содержание металлов в сплаве, мас.%	Скорость коррозии					
		Сплавы с Mg		Сплавы с Zn		Сплавы с Cd	
		$i_{кор.} \cdot 10^2, \text{А/М}^2$	$K \cdot 10^3, \text{г/М}^2 \cdot \text{час}$	$i_{кор.} \cdot 10^2, \text{А/М}^2$	$K \cdot 10^3, \text{г/М}^2 \cdot \text{час}$	$i_{кор.} \cdot 10^2, \text{А/М}^2$	$K \cdot 10^3, \text{г/М}^2 \cdot \text{час}$
0.03	0.0	0.031	10.38	0.031	10.38	0.031	10.38
	0.05	0.028	9.38	0.025	8.37	0.023	7.70
	0.1	0.025	8.37	0.023	7.70	0.020	6.70
	0.5	0.023	7.70	0.021	7.03	0.018	6.03
	1.0	0.021	7.03	0.019	6.36	0.016	5.36
0.30	0.0	0.036	12.06	0.036	12.06	0.036	12.06
	0.05	0.033	11.05	0.030	10.05	0.027	9.04
	0.1	0.031	10.38	0.028	9.38	0.025	8.37
	0.5	0.029	09.71	0.026	8.71	0.023	7.70
	1.0	0.027	09.04	0.024	8.04	0.021	7.03
3.00	0.0	0.042	14.07	0.042	14.07	0.042	14.07
	0.05	0.039	13.06	0.036	12.06	0.034	11.39
	0.1	0.037	12.39	0.034	11.39	0.031	10.38
	0.5	0.035	11.72	0.032	10.72	0.029	9.71
	1.0	0.033	11.05	0.030	10.05	0.027	9.04

Плотность тока коррозии и соответственно скорость коррозии алюминиевых сплавов с магнием, цинком и кадмием с ростом концентрации хлорид-иона увеличиваются. Независимо от их состава и особенностей физико-химических свойств легирующего компонента, данная зависимость характерна для всех сплавов AlBe-1, легирующими элементами.

Уменьшение скорости коррозии не коррелирует со свойствами самих металлов, т.е. при переходе от сплава AlBe-1 с магнием к сплавам с цинком и кадмием. С увеличением концентрации хлорид-иона в электролите NaCl также характерен рост скорости коррозии для алюминиевого сплава AlBe-1.

Таким образом, установлено, что легирование алюминиевого сплава AlBe-1 до 1,0 мас.% магнием, цинком и кадмием повышает его анодную устойчивость на почти в 2 раза в среде электролита NaCl.

ВЫВОДЫ

1. Проведены исследования по определению удельной теплоёмкости алюминиевого сплава AlBe-1, модифицированного Mg, Zn, Cd, в режиме «охлаждения» и её изменения от температуры и количества модифицирующих элементов. Результаты показали, что с повышением температуры, теплоёмкость исследованных сплавов снижается. Такая же тенденция наблюдается при увеличении легирующих элементов Mg, Zn и Cd. Сплавы, содержащие Cd характеризуются наименьшими значениями теплоёмкости.

2. Среди всех трёх добавленных металлов, Cd больше других приводит к снижению значений энтальпии и энтропии. Также было определено что с увеличением температуры основные термодинамические показатели системы (энтальпия, энтропия) увеличиваются, а энергия Гиббса показывает отрицательную динамику.

3. Анализ кинетики окисления сплавов показал, что процесс подчиняется гиперболическому закону, а характерные значения скорости окисления находятся в пределах $\sim 10^{-4}$ кг·м⁻²·с⁻¹. Сопоставление результатов позволило установить, что наибольшей кажущейся энергией активации характеризуется исходный сплав, тогда как минимальные значения этого параметра наблюдаются у сплавов, легированных 1,0 мас.% кадмия.

5. Также было выявлено что легирующие компоненты (Mg, Zn и Cd) при всех исследованных содержаниях улучшают его устойчивость к окислению. Сравнительный анализ образцов, легированных Zn, Mg и Cd, показал, что сплавы с добавлением кадмия обладают наименьшей окислительной стойкостью, что сопровождается снижением кажущейся энергии активации процесса окисления.

4. Анализ фазового состава продуктов окисления сплава AlBe-1, модифицированного добавками Mg, Zn и Cd, показал, что в структуре

оксидного слоя присутствуют как простые оксиды (Al_2O_3 , BeO , MgO , ZnO , CdO и др.), так и сложные оксидные и гидроксидные соединения, включая $\text{Al}(\text{OH})_3$, MgAl_2O_4 , AlOOH и $\text{Cd}_{1.44}\text{Al}_{10.88}\text{O}_{17.23}$. Это указывает на многофазный характер продуктов окисления и сложные механизмы их формирования.

5. Результаты изучения анодного поведения показали, что образцы, содержащие Mg , Zn , Cd в количестве 1.0 масс. % имеют устойчивость к коррозионному разрушению превышающую устойчивость исходного сплава на 30-50% в жидкой среде электролита хлорида натрия.

6. В результате добавок металлов Mg , Cd и Zn были получены новые составы на основе сплава AlBe-1 , имеющие улучшения в механических, коррозионно-электрохимических и эксплуатационных свойств. Разработанные составы защищены малым патентом Республики Таджикистан (ТJ № 1002 от 01.03.2022 г.).

***Статьи, опубликованные в научных журналах,
рекомендованных ВАК Российской Федерации***

1. Курбонова, М.З. Влияния магния на удельную теплоемкость и изменений термодинамических функции модельного алюминиевого сплава AlBe1 / М.З. Курбонова, И.Н. Ганиев, **И.А. Эмомов** // Перспективные материалы. -2025, -№1. -С.52-61. ISSN 2312-3648 (**Scopus-Q3**).

Kurbonova, M.Z. The Effect of Magnesium on Specific Heat Capacity and on Changes in Thermodynamic Functions of the Model Aluminum Alloy AlBe1 / M. Z. Kurbonova, I.N. Ganiev, **I.A. Emomov** // Inorganic Materials: Applied Research, -2025, -Vol. 16, -No. 5, pp. 1420–1427. © Pleiades Publishing, Ltd. (**Scopus-Q3**).

2. Kurbonova, M.Z. Impact of cadmium doping on the anodic behavior of aluminum alloy AlBe1 in NaCl electrolyte: Corrosion rate. Reduction and potential shifts / M. Z. Kurbonova, I.N. Ganiev, **I.A. Emomov** // Inorganic Materials: Applied Research, -2026, -Vol. 1, -No. 1, pp. © Pleiades Publishing, Ltd. (**Scopus-Q3**).

3. **Эмомов, И.А.**, Исследование микроструктуры и механических свойств алюминиево-бериллиевого сплава AlBe-1 , легированного Zn , Mg и Cd / **И.А. Эмомов**, М.З. Курбонова, И.Н. Ганиев // Вестник Таджикский национальный университета (Серия естественных наук). - 2026. -№ 1 (1). -С.217-228.

4. Kurbonova, M.Z. Anode behavior of aluminum alloy AB1 with magnesium / M.Z. Kurbonova, **I.A. Emomov**, N.T. Rakhimova, I.N. Ganiev, D.A. Kurbonova, U.M. Norkulov // E3S Web of Conferences T.401, 05054 (2023) CONMECHYDRO.- 2023.

5. **Эмомов, И.А.** Анодное поведение алюминиевого сплава Al-Be1 с добавками кадмия в среде электролита 0.03%-ного NaCl /

И.А.Эмомов, М.З. Курбонова, И.Н. Ганиев // Вестник Дангаринского государственного университета (Серия естественных наук). - 2023. -№ 4 (26). -С.117-128

Изобретения по теме диссертации:

6. Эмомов И.А. Малый патент Республики Таджикистан №ТJ1276. от 04.02.2022г «Сплав алюминий с бериллием» / Ганиев И.Н., Сафаров А.М., Курбонова М.З., **Эмомов И.А.**, Исмонов Р.Д., Якубов У.Ш., **Рахимова Н.О.**, Абуали Элмурод//№1801241; заявл. 04.04.2022г., опублик. 04.02.2022.

Статьи, опубликованные в материалах международных и республиканских конференций:

7. Эмомов И.А. Анодное поведение алюминиевого сплава АБ1 с цинком в среде электролита 0.03%-ного NaCl / **Эмомов И.А.** // Наука и инновация. -№4. -2021, ISSN 2312-3648. -С. 146-151

8. Курбонова М.З. Электрохимические свойства алюминиевого сплава АБ1 с магнием/ Курбонова М.З., **Эмомов И.А.**, Рахимова Н.О., Ганиев И.Н// Мат. респ. научно-прак. конф. профессорско-преподавательского состава и сотрудников ТНУ, посвященной 30-летию Государственной независимости РТ, 110-летию со дня рождения Народного поэта Таджикистана, Героя Таджикистана Мирзо Турсунзаде, 110 летию со дня рождения народного писателя Таджикистана Сотима Улугзода и «20-летию изучения и развития естественных, точных и математических наук в сфере науки и образования (2020-2040)». - Душанбе. - 2021. -С.248-250

9. Эмомов И.А. Электрохимические свойства алюминиевого сплава АБ1 с магнием, в нейтральной среде/ **Эмомов И.А.**, Рахимова Н.Т., Курбонова М.З., Ганиев И.Н.// Матер. 1-ой межд. научно-прак. конф. “Перспективы развития исследований в области химии координационных соединений и аспекты их применений”, посвящ. памяти профессора Баситовой Саодат Мухаммедовны, 80-летию со дня рождения и 60-летию педагогической и научно-исследовательской деятельности д.х.н., профессора Азизкуловой Онаджон Азизкуловны. – Душанбе. - 2022. - С.252-256

10. Эмомов И.А. Кинетика окисления алюминиевых сплавов АБВ1 с добавкой магния / **Эмомов И. А.**, Рахимова Н.Т., Курбонова М.З., Ганиев И.Н.// Мат. респуб. научно-прак. конф. «Современные проблемы естествознания в науке и образовательном процессе», посвящ. двадцатилетию изучения и развития естественных, точных и математических наук (27 мая 2022 г.). -Душанбе. -2022. -С.140-142

11. Эмомов И.А. Влияние кадмия на анодную устойчивость алюминиевого бериллиевого сплава А1Ве-1, в среде 0,03%-ного NaCl/ **Эмомов И.А.**, Курбонова М.З., Ганиев И.Н., Курбанова Д.А.// Сборник мат. межд. научно – прак. конф. на тему «Использование современных

методов обучения в образовательных учреждениях: проблемы и перспективы» посвящённой «2020-2040 годы «Двадцатилетия изучения естественных, точных и математических наук в сфере науки и образования»», «65-летию химического факультета ТНУ» и «55-летию кафедры методики преподавания химии химического факультета ТНУ». - Душанбе. -2023. -С.201-206.

12. Курбонова М.З. Удельная теплоемкость алюминиевого сплава AlBe-1 с магнием/ Курбонова М.З., **Эмомов И.А.**, Ганиев И.Н., Курбанова Д.// Сборник мат. межд. научно – прак. конф. на тему «Использование современных методов обучения в образовательных учреждениях: проблемы и перспективы» посвящённой «2020-2040 годы «Двадцатилетия изучения естественных, точных и математических наук в сфере науки и образования»», «65-летию химического факультета ТНУ» и «55-летию кафедры методики преподавания химии химического факультета ТНУ». -Душанбе. -2023. -С.363-367.

13. Эмомов И.А. Анодное поведение алюминиево-бериллиевого сплава AlBe-1, с цинком в средах электролита 3.0%-ного NaCl/ **Эмомов И.А.**, Курбонова М.З., Ганиев И.Н.// Материалы общеуниверситетской научн.-теоретич. конф. преподавателей и сотрудников ТНУ, посвящ. «30-летию принятия Конституции РТ», «Объявлению 2024 года – Годом правового просвещения» и «Двадцатилетию изучения и развития естественных, точных и математических наук в сфере науки и образования (2020-2040 годы)» Том I. Душанбе. -2024. - С.104-108.

14. Эмомов И.А. Влияние цинка на анодное поведение алюминиево-бериллиевого сплава Al-Be1 в среде электролита 0.03%-ного NaCl / **Эмомов И.А.**, Курбонова М.З., Ганиев И.Н.// Сб. статей VI межд. науч. конф.: «Вопросы физической и координационной химии» - Душанбе. -2024. -С.167-172.

15. Эмомов И.А. Влияние кадмия на анодное поведение алюминиевого сплава AlBe1 в среде электролита 3,0%-ного NaCl / **Эмомов И.А.**, Курбонова М.З., Ганиев И. Н., Назарова М.Т.// Материалы межд. Научн.-практ. конф., посвященной «Реализации стратегии развития точных и математических наук на 2020-2040 годы и государственной целевой программы развития математических, естественных и естественных наук на 2021-2025годы» и в честь дня таджикской науки под названием «Технологии и инновации в реализации стратегии развития науки и технологий» (вклад развития математических, точных и естественных наук в развития промышленности и сферы сервиса) (26 апреля 2025 г.).-Душанбе.-2025.- С.128-134.