

На правах рукописи



БОКИЕВ ЛОИК АЛИМОВИЧ

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АЛЮМИНИЕВОГО
СПЛАВА $Al_5Fe_{10}Si$ С ЛИТИЕМ, МАГНИЕМ И ЦЕРИЕМ**

02.00.04 - Физическая химия

АВТОРЕФЕРАТ

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

Душанбе – 2020

Работа выполнена в лаборатории «Коррозионностойкие материалы» ГНУ Института химии им. В. И. Никитина НАНТ.

Научный руководитель: **Ганиев Изатулло Наврузович** – доктор химических наук, профессор, академик Национальной академии наук Таджикистана

Официальные оппоненты: **Умарова Татьяна Мухсиновна** – доктор технических наук, начальник отдела науки, инноваций и международных связей Филиала МГУ им. В.И. Ломоносова в г. Душанбе

Олимов Насруддин Солихович – кандидат химических наук, заведующий кафедрой «Общетехнические дисциплины и машиноведение» Таджикского государственного университета им. С. Айни

Ведущая организация: Государственного научного учреждения «Центр исследования инновационных технологий» при НАНТ.

Защита состоится: **«30» ноября 2020 г. в 12⁰⁰** часов на заседании диссертационного совета Д 047.003.03 при ГНУ Институте 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 Института химии им В.И. Никитина НАНТ www.chemistry.tj

Автореферат разослан «_____» _____ 2020 года

И. о. учёного секретаря
диссертационного
совета, д.х.н., профессор



Исобаев М.Дж.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Алюминиевые сплавы в последнее время как конструкционный материал заняли значительную позицию вместо стальных конструкций. С учётом подробного исследования и анализа диаграмм состояния металлических систем были разработаны легкие сплавы на основе алюминия в качестве конструкционного материала, эквивалентные или превосходящие стальным, например сплавы алюминия с добавками цинка, магния, меди и ряд других металлов.

Повышенное содержание примесей, как кремний и железо, в алюминии и алюминиевых сплавах является главным препятствием к их широкому применению в различных областях производства. Фазы с алюминием, которые образуются из примесей кремния и железа, в итоге создают внутренние дефекты как структурной неоднородности, что отрицательно оказывают влияние на качество продукции. Следовательно, затратным являются очистки из железа алюминия.

Анализ литературы показывают, что алюминий низкой степени чистоты с повышенным содержанием железа почти не находит использования, кроме для раскисления и дегазации стали. Отсюда перспективным является разработка алюминиевых сплавов на основе технического алюминия с повышенным содержанием железа. Кроме того, сплавы алюминия с железом, литием, магнием и церием широко применяют в качестве носителя электрического заряда в электротехнике.

Таким образом, цель работы заключалась в разработке новых сплавов на основе низкосортного алюминия, с тем, чтобы превратить данный металл в сплав, который отличался бы особыми свойствами и мог применяться в промышленности. Для реализации поставленной цели в качестве объекта исследования был выбран тройной алюминиевой сплав эвтектического состава $Al_5Fe_{10}Si$, которое подвергался легированию литием, магнием, церием в количестве от 0.01 до 1.0 мас. %.

Целью работы является установление термодинамических, кинетических и анодных свойств алюминиевого сплава $Al_5Fe_{10}Si$ с литием, магнием и церием, предназначенного для нужд отдельных отраслей промышленности.

Задачи исследования:

- Изучение температурной зависимости теплоёмкости и изменений термодинамических функций алюминиевого сплава $Al_5Fe_{10}Si$ с литием, магнием и церием.

- Изучение кинетики окисления алюминиевого сплавов АЖ5К10 с литием, магнием и церием, в твердом состоянии и определение механизма процесса их окисления.
- Экспериментальное определение влияния лития, магния и церия на анодное поведение сплава Al5Fe10Si, в среде электролита NaCl.
- Оптимизация состава тройных сплавов на основе установления их физико-химических свойств и определение возможных областей их использования.

Научная новизна исследований. Установлены основные закономерности изменения теплоемкости и термодинамических функций (энтальпии, энтропии и энергии Гиббса) сплава Al5Fe10Si с литием, магнием и церием в зависимости от температуры и количества легирующего компонента. Показано, что с ростом температуры теплоемкость, энтальпия и энтропия алюминиевого сплава Al5Fe10Si с литием и магнием увеличиваются, а энергия Гиббса сплавов уменьшается. С увеличением доли лития и магния в сплаве Al5Fe10Si энтальпия и энтропия увеличиваются, у сплавов с церием уменьшается. Энергия Гиббса имеет обратную зависимость.

Показано, что с ростом температуры скорость окисления алюминиевого сплава Al5Fe10Si с литием, магнием и церием, в твердом состоянии увеличивается. Константа скорости окисления имеет порядок $10^{-4} \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$. Установлено, что кинетика окисления алюминиевого сплава Al5Fe10Si с литием, магнием и церием подчиняется гиперболическому закону. Потенциостатическим методом в потенциодинамическом режиме при скорости развертки потенциала 2 мВ/с установлено, что добавки легирующих компонентов до 0,5 мас.% увеличивают коррозионную стойкость исходного сплава Al5Fe10Si в два раза. При этом отмечается сдвиг потенциала коррозии исходного сплава в положительную область. Потенциалы питтингообразования и репассивации – также смешаются в положительном направлении оси ординат.

Практическая значимость работы. Выполненные исследования позволили выявить составы сплавов, отличающихся наименьшей окисляемостью при высоких температурах и подобрать оптимальные концентрации легирующих добавок (лития, магния и церия) для повышения коррозионной стойкости исходного сплава Al5Fe10Si.

На основе проведенных исследований отдельные составы алюминиевого сплава Al5Fe10Si с литием, магнием и церием защищены малыми патентами Республики Таджикистан.

Методы исследования и использованная аппаратура. Объектом исследования служил алюминиевый сплав с железом и кремнием эвтектического состава $Al_5Fe_{10}Si$ (мас.%), а также металлические литий, магний и церий. Исследования проводились измерением теплоемкости в режиме «охлаждения», термогравиметрическим, металлографическим, (микроскоп НЕОРНОТ-31), рентгенофазовым (Дрон-3), потенциостатическим методом на потенциостате (ПИ-50.1.1). Математическая обработка результатов проводилась с использованием стандартного пакета приложения и программы Microsoft Excel.

На защиту выносятся:

- Результаты исследования температурных зависимостей теплоемкости и изменений термодинамических функций алюминиевого сплава $Al_5Fe_{10}Si$ с литием, магнием и церием.
- Кинетические и энергетические параметры процесса окисления алюминиевого сплава $Al_5Fe_{10}Si$ с литием, магнием и церием, а также механизм окисления сплавов.
- Зависимости анодных характеристик и скорости коррозии алюминиевого сплава $Al_5Fe_{10}Si$ с литием, магнием и церием от концентрации легирующего компонента, в среде электролита NaCl.
- Оптимальные составы сплавов, отличающихся наименьшей окисляемостью и повышенной коррозионной стойкостью, представляющие интерес в качестве анодного материала для изготовления протекторов, при защите от коррозии стальных конструкций.

Личный вклад автора 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.

1. **Степень достоверности и апробация результатов.** Основные положения диссертации обсуждались на: Респ. научно - практ. конф. «Проблемы материаловедения в Республике Таджикистан». Институт химии им. В.И. Никитина АН Республики Таджикистан, (Душанбе 2016г); XIII Межд. научно.-практ. конф. «Нумановские чтения», посвящ. 70-летию основания Института химии им. В.И. Никитина АН Республики Таджикистан и достижению химической науки за 25 лет Государственной независимости Республики Таджикистан (Душанбе, 2016); Материалы XXI Межд. научно-практ.конф. Нумановские чтения, посвящ. «Году молодежи», «Вклад молодых учёных в развитие химической науки Ин-та химии им. В.И. Никитина АН РТ»;

Респ. научно-практ. конф. «Наука и техника для устойчивого развития»; VIII Межд. науч.-практ. конф. «Перспективы использования материалов, устойчивых к коррозии, в промышленности Республики Таджикистан», посвященной «Дню химика» (Душанбе, 2018). Мат. Республиканской научно-практической конференции «Актуальные проблемы индустриализации Республики Таджикистан: проблемы и стратегии» Часть 1. (ТУТ, Душанбе, 2019). Матер. Межд. научно-практической конференции «Вопросы физической и координационной химии» Часть 1. (ТНУ, Душанбе, 2019).

Публикации. По результатам исследований опубликовано 10 научных работ, из них 5 статей в рецензируемых научных журналах, рекомендуемых ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации и 5 статей в материалах международных и республиканских конференций. Также получено 2 малых патента Республики Таджикистан.

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и приложения, изложена на 143 страницах компьютерного набора, включает 57 рисунка, 63 таблиц, 131 библиографических наименований.

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

В первой главе описаны структурообразование сплавов алюминия с железом, кремнием, литием, магнием и церием, теплофизические свойства алюминия, железа, кремния, лития, магния и церия, особенности окисления и коррозионно-электрохимического поведения сплавов алюминия с железом, кремнием, литием, магнием и церием, в различных средах. На основе выполненного обзора отмечено, что теплофизические свойства алюминия, железа, кремния, лития, магния и церия хорошо изучены. Имеются сведения о влиянии температуры и чистоты металлов на их тепловые и теплофизические свойства. Однако в литературе отсутствует информация о физико-химических свойствах алюминиевого сплава $Al_5Fe_{10}Si$, легированного литием, магнием и церием.

Таким образом, в связи с отсутствием систематических данных о физико-химических свойствах алюминиевого сплава $Al_5Fe_{10}Si$, легированного литием, магнием и церием последние были взяты в качестве объекта исследования в данной диссертационной работе.

Во второй главе приведены результаты исследования температурной зависимости теплоёмкости и изменений термодинамических функций алюминиевого сплава $Al5Fe10Si$, легированного литием, магнием и церием.

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию кинетики окисления алюминиевого сплава $Al5Fe10Si$, легированного литием, магнием и церием.

В четвертой главе приведены результаты экспериментального исследования анодного поведения алюминиевого сплава $Al5Fe10Si$, легированного литием, магнием и церием, в среде электролита $NaCl$.

Диссертационная работа завершается общими выводами, списком цитированной литературы и приложением.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ТЕПЛОЕМОСТИ И ИЗМЕНЕНИЙ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА $Al5Fe10Si$, ЛЕГИРОВАННОГО ЛИТИЕМ, МАГНИЕМ И ЦЕРИЕМ

В данной работе 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 теплоемкости металлов использован закон охлаждения Ньютона - Рихмана. Всякое тело, имеющее температуру выше окружающей среды, будет охлаждаться, причем скорость охлаждения зависит от величины теплоемкости тела и коэффициента теплоотдачи.

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 будут 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 $C_{p_2}^0$

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

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. Погрешность измерения теплоемкости по данной методике не превышает 6%.

В рамках данной работы исследовано влияние лития, магния и церия на теплоемкость и изменений термодинамических функций алюминиевого сплава Al5Fe10Si. Сплавы для исследования получали из лигатуры Al+5%Fe, Al+Ж2%Si и лития металлического марки ЛЭ1(804-93), магния металлического марки МПЧ (804-93), который в завёртнутом в алюминиевой фалге вводились в расплав (8774-75), церия металлического марки СеМ1 (25772-83).

Синтез сплавов осуществлен в лабораторных шахтных печах сопротивления марки СШОЛ при температуре 750-850 °С с использованием лигатур алюминия. Из синтезированных сплавов в графитовые изложницы отливали цилиндрические образцы высотой 30 мм и диаметром 16 мм.

Измерение теплоемкости проводилось на установке¹, схема которой представлена на рисунке 1. Установка состоит из следующих узлов: электропечь (3) смонтирована на стойке (6), по которой она может перемещаться вверх и вниз (стрелкой показано направление перемещения). Образец (4) и эталон (5) (тоже могут перемещаться) представляют собой цилиндр длиной 30 мм и диаметром 16 мм с высверленными каналами с одного конца, в которые вставлены термопары (4 и 5). Концы термопар подведены к цифровому многоканальному термометру (7), который подсоединен к компьютеру (8).

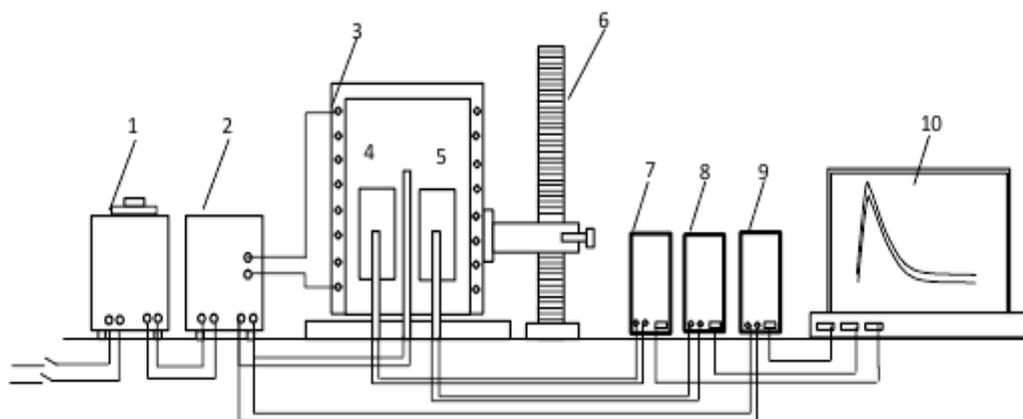


Рисунок 1 – Установка для определения теплоемкости твердых тел в режиме «охлаждения»: 1-автотрансформатор; 2-терморегулятор; 3-электропечь; 4-образец измеряемый; 5-эталон 6-стойка электропечи; 7-цифровой термометр измеряемого образца; 8-цифровой термометр эталона; 9-цифровой термометр общего назначения; 10-регистрационный прибор (компьютер).

Включаем электропечь (3) через автотрансформатор (1), установив нужную температуру с помощью терморегулятора (2). По показаниям цифрового многоканального термометра (7) отмечаем значение начальной температуры. Вдвигаем измеряемый образец (4) и эталон (5) в электропечь (3) и нагреваем до нужной температуры, контролируя температуру по показаниям цифрового многоканального термометра на компьютере (8). Далее измеряемый образец (4) и эталон (5) одновременно выдвигаем из электропечи (3). С этого момента фиксируем снижение температуры. Записываем показания цифрового термометра (7) на компьютере (8) через фиксированное время 10с. Охлаждаем образец и эталон ниже 30⁰С.

¹Малый патент Респ. Таджикистан № TJ 877, приоритет изобретения от 20.04.2017 г.

Температурную зависимость теплоемкости алюминиевого сплава Al5Fe10Si, легированного литием, изучали в режиме «охлаждения» в интервале температур 298,15-800К.

На рисунке 2 представлены экспериментально полученные зависимости температуры образцов алюминиевого сплава Al5Fe10Si с литием, которые описываются уравнением.

$$T = a e^{-b\tau} + p e^{-k\tau} \quad (8)$$

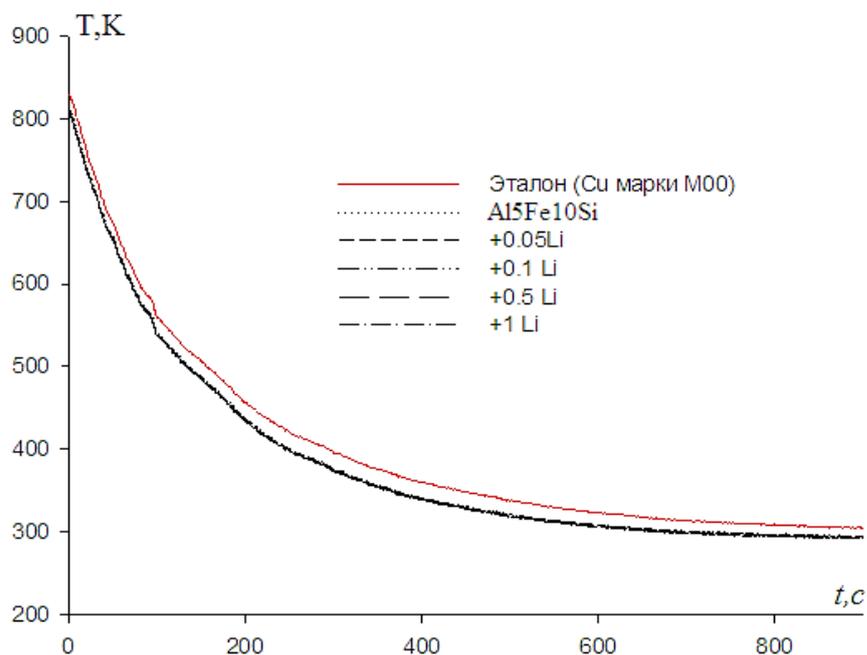


Рисунок 2– Зависимость температуры образцов от времени охлаждения для образцов из алюминиевого сплава Al5Fe10Si с литием и эталона (Cu марки М00).

Проводя дифференцирование уравнения (8) по t, получим уравнение для определения скорости охлаждения алюминиевого сплава Al5Fe10Si с литием, вида.

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

По данному дифференцированному уравнению были рассчитаны скорости охлаждения образцов сплавов, которые графически приведены на рисунке 3. В таблице 1 для исследованных сплавов представлены экспериментальные значения коэффициентов a , b , p , k , ab , pk в уравнении (9). Результаты экспериментов обработаны по программе MS Excel, графики построены с

помощью программы Sigma Plot. При этом коэффициент корреляции составлял не менее 0,994.

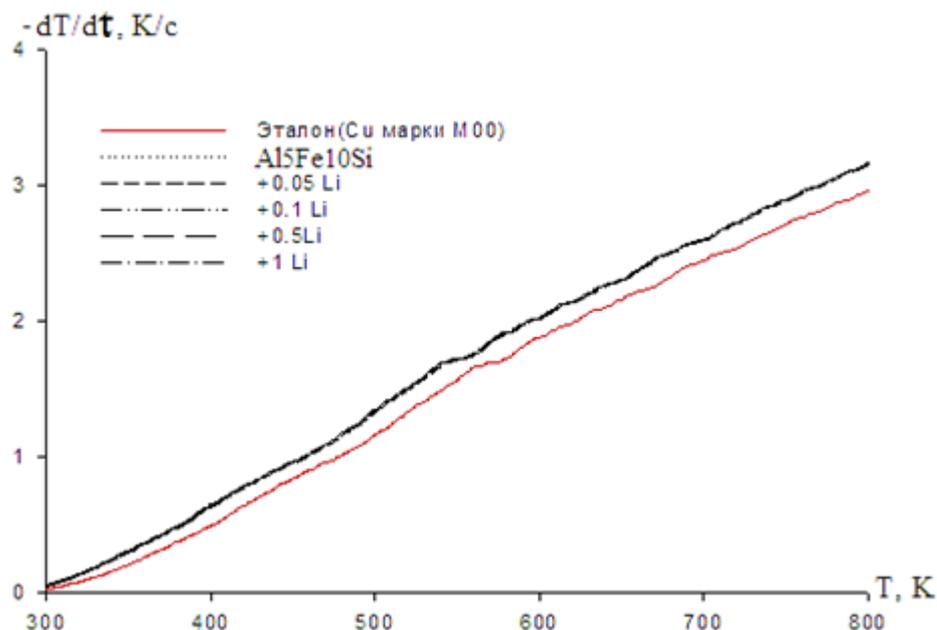


Рисунок 3 – Температурная зависимость скорости охлаждения образцов из сплава Al5Fe10Si с литием и эталона (Cu марки M00).

Таблица 1 – Значения коэффициентов a , b , k , ab , pk уравнений (9) для образцов и сплава Al5Fe10Si с литием и эталона (Cu марки M00)

Содержание лития в сплаве, мас.%	a, K	$b \cdot 10^{-3}, c^{-1}$	p, k	K, c^{-1}	$ab, K \cdot c^{-1}$	$pk, K \cdot c^{-1}$
Сплав Al5Fe10Si (1)	488.56	6.64	309.43	5.30	3.25	1.67
(1)+0.05	485.34	6.64	310.79	5.27	3.22	1.64
(1)+0.1	485.34	6.64	310.69	5.27	3.22	1.64
(1)+0.5	485.34	6.64	310.89	5.27	3.22	1.64
(1)+1.0	485.34	6.64	309.99	5.28	3.22	1.64
Эталон (Cu марки M00)	481.33	6.48	329.32	8.12	3.12	2.67

Для вычисления удельной теплоемкости алюминиевого сплава Al5Fe10Si с литием по уравнению (7). использовали значения скорости охлаждения эталона (Cu M00) и сплавов.

Температурная зависимость теплоемкости алюминиевого сплава Al5Fe10Si с литием описывается уравнением.

$$C^0_p = a + bT + cT^2 + dT^3 \quad (10)$$

С помощью уравнения (7) были получены нижеследующие коэффициенты уравнения температурной зависимости удельной теплоемкости алюминиевого сплава Al5Fe10Si и сплавов, легированного литием (таблица 2).

Таблица 2 – Значения коэффициентов a , b , c , d уравнении (10) для алюминиевого сплава Al5Fe10Si с литием и эталона (Cu марки M00)

Содержание лития в сплаве, мас.%	a , Дж/кг·К	b , Дж/кг·К ²	$c \cdot 10^3$, Дж/кг·К ³	$d \cdot 10^6$, Дж/кг·К ⁴	Коэффициент корреляции R^2 , %
Al5Fe10Si (1)	-4049,32	29,52	-5,33	3,13	0,9925
(1)+0.05	-3987,08	29,80	-5,38	3,16	0,9984
(1)+0.1	-3854,02	29,81	-5,38	3,16	0,9910
(1)+0.5	-3853,95	29,79	-5,37	3,15	0,9963
(1)+1.0	-3804,72	29,73	-5,37	3,16	0,9954
Эталон (Cu марки M00)	324,454	0,2751	-0,0287	0,0142	1,0000

Рассчитанные значения удельной теплоемкости алюминиевого сплава Al5Fe10Si с литием, через 100К приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Температурная зависимость удельной теплоемкости алюминиевого сплава Al5Fe10Si с литием и эталона (Cu марки M00).

Содержание лития в сплаве, мас.%	Т, К					
	300	400	500	600	700	800
Сплав Al5Fe10Si (1)	848,80	1225,90	1288,20	1223,50	1219,60	1464,30
(1)+ 0.05	852,68	1235,88	1301,48	1239,08	1238,28	1488,68
(1)+ 0.1	854,54	1238,37	1304,6	1242,83	1242,66	1493,69
(1)+ 1.0	862,22	1246,32	1314,82	1257,32	1263,42	1522,72
Эталон (Cu марки M00)	384,98	397,66	408,00	416,86	425,10	433,55

По экспериментально полученным значениям скорости охлаждения образцов и по рассчитанным результатам теплоемкости сплавов с литием провели расчет температурной зависимости коэффициента теплоотдачи ($\text{Вт/К}\cdot\text{м}^2$) по уравнению (5). Результаты расчёта представлены на рисунке 4.

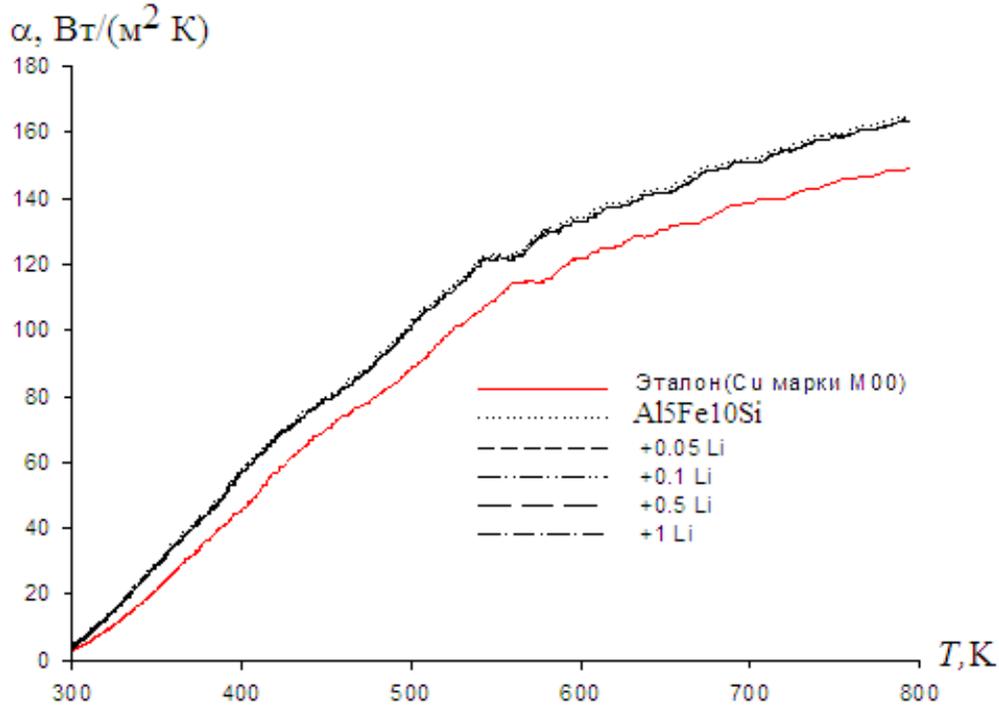


Рисунок 4 – Температурная зависимость коэффициента теплоотдачи алюминиевого сплава Al5Fe10Si с литием и эталона(Cu марки М00).

Для расчета температурной зависимости изменений энтальпии, энтропии и энергии Гиббса по уравнениям (11) - (13), были использованы интегралы от теплоемкости по (10) для алюминиевого сплава Al5Fe10Si с литием.

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

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

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

Результаты расчёта температурной зависимости изменений энтальпии, энтропии и энергии Гиббса для алюминиевого сплава Al5Fe10Si с литием и эталона (Cu марки М00) через 100К представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Температурная зависимость изменений энтальпии, энтропии и энергия Гиббса для алюминиевого сплава Al5Fe10Si с литием и эталона (Cu марки M00)

Т, К	Эталон (Cu марки M00)	Сплав Al5Fe10Si	Сплав Al5Fe10Si +0.05% Li	Сплав Al5Fe10Si +0.1% Li	Сплав Al5Fe10Si +1.0% Li
	$[H^0(T) - H^0(T_0^*)]$, кДж/кг для сплавов				
300	0.711	1,57	1,56	1,57	1,58
400	39.867	109,64	109,43	109,65	110,43
500	80.166	238,39	238,15	238,65	240,32
600	121.419	365,72	365,46	366,30	369,19
700	163.519	488,32	488,02	489,27	493,91
800	206.446	621,66	621,49	623,21	630,31
$[S^0(T) - S^0(T_0^*)]$, кДж/кг · К для сплавов					
300	0,0023	0,0052	0,0052	0,0051	0,0052
400	0,114	0,313	0,312	0,313	0,315
500	0,204	0,600	0,599	0,601	0,605
600	0,280	0,832	0,832	0,834	0,840
700	0,344	1,021	1,021	1,023	1,032
800	0,402	1,199	1,198	1,202	1,214
$[G^0(T) - G^0(T_0^*)]$, кДж/кг для сплавов					
300	-0,0022	-0,0048	-0,0048	-0,0048	-0,0049
400	-6,10	-15,77	-15,72	-15,76	-15,88
500	-22,24	-61,89	-61,78	-61,90	-62,35
600	-46,58	-134,02	-133,83	-134,12	-135,09
700	-77,90	-227,00	-226,74	-227,25	-228,99
800	-115,31	-338,01	-337,67	-338,46	-341,27

* $T_0 = 298,15\text{К}$.

Таблица 5 – Температурная зависимость удельной теплоёмкости (Дж/кг · К) алюминиевого сплава Al5Fe10Si с литием, магнием и церием

Содержание Li, Mg, Ce в сплаве, мас. %	Т, К					
	300	400	500	600	700	800
Сплав Al5Fe10Si (1)	848,80	1225,90	1288,20	1223,50	1219,60	1464,30
(1)+1.0 Li	862,22	1246,32	1314,82	1257,32	1263,42	1522,72
(1)+1.0 Mg	851,01	1238,01	1310,31	1255,61	1261,71	1516,41
(1)+1.0 Ce	825,48	1205,58	1268,88	1203,18	1196,28	1435,98
Эталон (Cu марки M00)	384,98	397,66	408,00	416,86	425,10	433,55

В таблицах 5, 6 обобщены результаты исследования теплоемкости и изменений термодинамических функций алюминиевого сплава Al5Fe10Si с литием, магнием и церием, на примере сплавов, содержащих 1,0 мас.% легирующего компонента. Видно, что с ростом температуры теплоемкость, энтальпия и энтропия увеличиваются, а величина энергии Гиббса сплавов уменьшается.

Таблица 6 – Зависимость изменения энтальпии (кДж/кг), энтропии (кДж/кг·К) и энергии Гиббса (кДж/кг) от температуры для алюминиевого сплава Al5Fe10Si с литием, магнием и церием

Содержание Li, Mg, Ce в сплаве, мас.%	$[H^0(T) - H^0(T_0)]$, кДж/кг для сплавов					
	Т, К					
	300	400	500	600	700	800
Сплав Al5Fe10Si (1)	1,574	109,64	238,39	365,72	488,32	621,66
(1)+1.0 Li	1,516	106,49	240,99	376,44	526,26	603,44
(1)+1.0 Mg	1,563	109,41	238,67	367,24	491,82	627,87
(1)+1.0 Ce	1,511	106,42	232,07	355,96	474,66	474,66
Эталон (Cu марки М00)	0.711	39.867	80.166	121.419	163.519	206.446
$[S^0(T) - S^0(T_0)]$, кДж/(кг · К) для сплавов						
Сплав Al5Fe10Si (1)	0,0052	0,313	0,600	0,832	1,021	1,199
(1)+1.0 Li	0,0050	0,304	0,584	0,810	0,993	1,165
(1)+1.0 Mg	0,0052	0,312	0,600	0,835	1,027	1,208
(1)+1.0 Ce	0,0047	0,300	0,580	0,805	0,990	1.158
Эталон (Cu марки М00)	0,0023	0,114	0,204	0,280	0,344	0,402
$[G^0(T) - G^0(T_0)]$, кДж/кг для сплавов						
Сплав Al5Fe10Si (1)	-0,0048	-15,77	-61,89	134,02	-227,00	-338,01
(1)+1.0 Li	-0,0046	-15.28	-60.13	-130.32	-120.77	-328.63
(1)+1.0 Mg	-0,0048	-15,71	-61,80	-134,07	-228,99	-339,22
(1)+1.0 Ce	-0,0040	-15.22	-60.06	-130.27	-120.71	-328.55
Эталон (Cu марки М00)	-0,0022	-6,10	-22,24	-46,58	-46,58	-115,31

ИЗУЧЕНИЕ КИНЕТИКИ ПРОЦЕССА ОКИСЛЕНИЯ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА Al5Fe10Si С ЛИТИЕМ, МАГНИЕМ И ЦЕРИЕМ, В ТВЕРДОМ СОСТОЯНИИ

Кинетику окисления алюминиевого сплава Al5Fe10Si в твердом состоянии изучали термогравиметрическим методом. Сплавы для исследования были получены в печи сопротивления типа СШОЛ. Взвешивание шихты производили на аналитических весах АРВ-200 с точностью $0.1 \cdot 10^{-6}$ кг.

Кинетика окисления алюминиевого сплава Al5Fe10Si с литием, изучена на сплавах, содержащих: 0.01; 0.05; 0.1; 0.5; 1.0 мас.% добавки. Кинетические и энергетические параметры процесса окисления данных сплавов приведены на рисунках 5-7 и в таблицах 7 и 8.

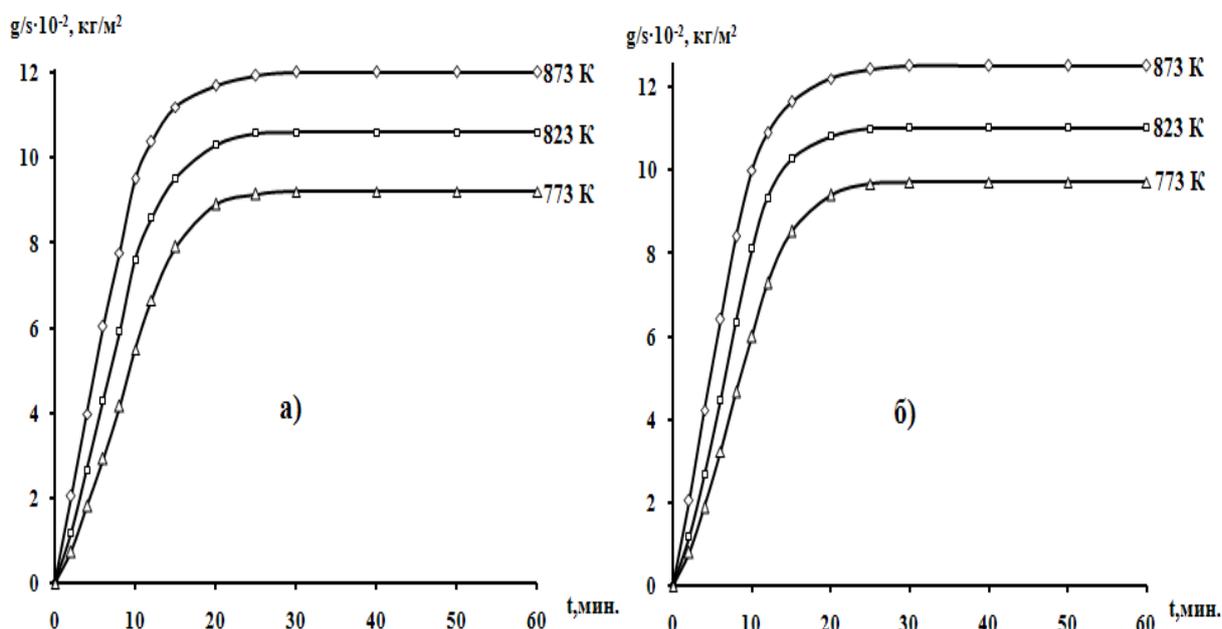


Рисунок 5 – Кинетические кривые окисления алюминиевого сплава Al5Fe10Si (а) с 0.01 мас.% литием (б), в твёрдом состоянии

Характер кинетических кривых окисления алюминиевого сплава Al5Fe10Si показывает, что окисление в начальных стадиях протекает интенсивно, о чем свидетельствует рост величины удельной массы образцов. Истинная скорость окисления алюминиевого сплава Al5Fe10Si в зависимости от температуры изменяется в пределах $1.42 \cdot 10^{-4}$ до $1.76 \cdot 10^{-4}$ $\text{кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1}$. Кажущаяся энергия активации процесса окисления, вычисленная по тангенсу угла наклона прямой зависимости $\lg K - 1/T$, составляет 178.0 кДж/моль (таблица 7).

Результаты исследования кинетики окисления алюминиевого сплава Al5Fe10Si с литием обобщены в таблице 8. Окисление алюминиевого сплава Al5Fe10Si, содержащего 0.01 мас.% лития, в твёрдом состоянии проводили при температурах 773К, 823К и 873К. Кинетические кривые окисления сплава приведены на рисунке 5б. Скорость окисления сплава в зависимости от времени и температуры увеличивается. Однако рост величины удельной массы образца к 20 минутам приобретает постоянное значение равное $12.20 \cdot 10^{-2}$ кг/м² при 873К. Кажущаяся энергия активации процесса окисления для данного сплава составляет 143.9 кДж/моль (таблица 7).

Таблица 7 – Кинетические и энергетические параметры процесса окисления алюминиевого сплава Al5Fe10Si с литием, в твердом состоянии

Содержание лития 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	773	1.42	178.0
	823	1.61	
	873	1.76	
0.01	773	2.13	143.9
	823	2.23	
	873	2.52	
0.05	773	2.43	133.1
	823	2.61	
	873	2.83	
0.1	773	2.68	126.5
	823	2.89	
	873	3.10	
0.5	773	2.87	115.2
	823	3.13	
	873	3.29	
1.0	773	3.11	106.4
	823	3.36	
	873	3.57	

Приведенная на рисунке 6 зависимость $\lg K - 1/T$ для алюминиевого сплава Al5Fe10Si с литием, показывает, что процесс окисления при вышеуказанных температурах с ростом количества лития в сплаве Al5Fe10Si растёт. Изохронны окисления сплавов системы Al5Fe10Si -Li приведенные на рисунке 7, показывает, что с ростом концентрации лития привес сплавов увеличивается.

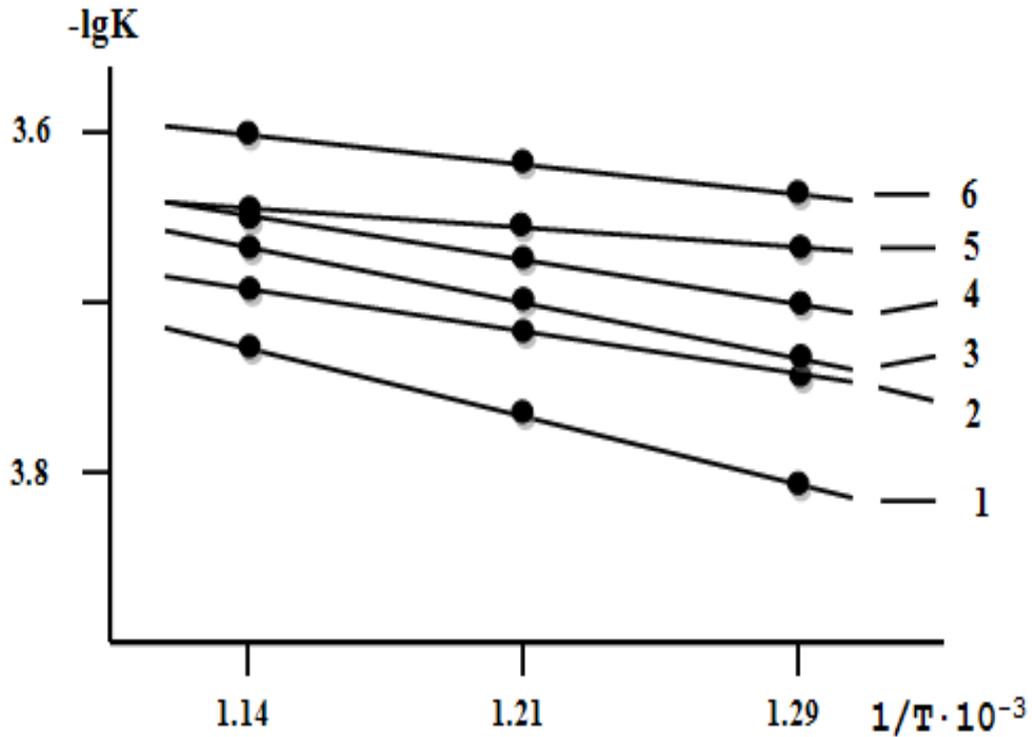


Рисунок 6 – Зависимость $\lg K$ от $1/T$ для сплава $Al_5Fe_{10}Si$ (1) с литием, мас.% 0,01(2); 0,05(3); 0,1(4); 0,5(5); 1,0(6)

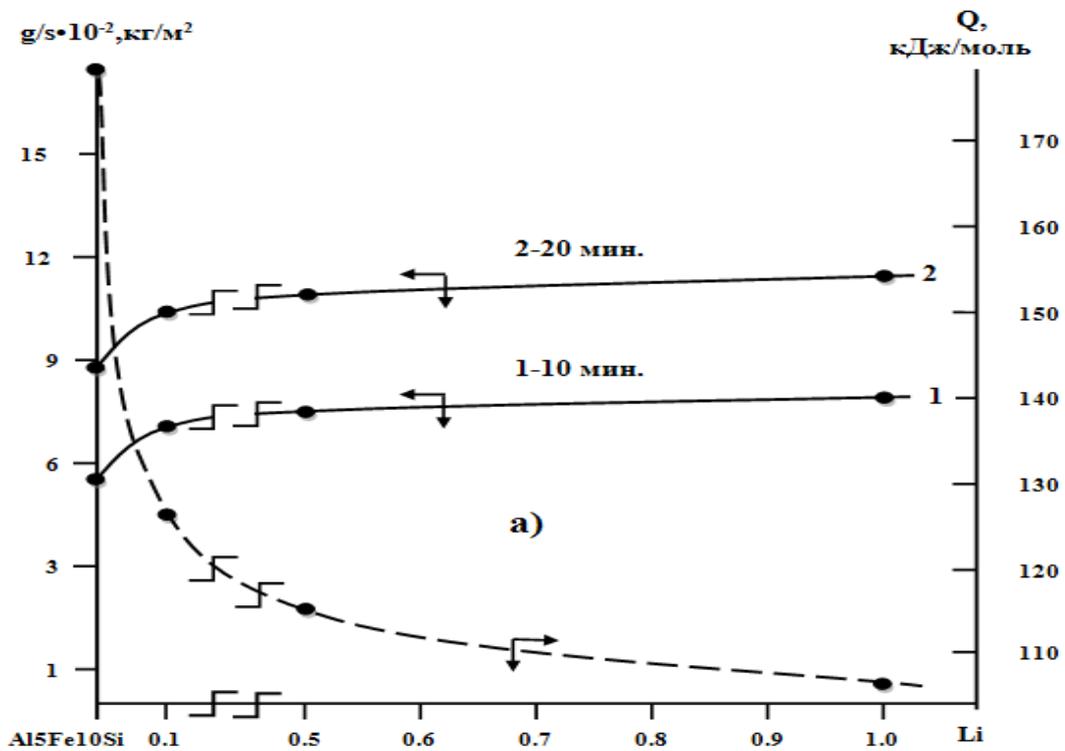


Рисунок 7 – Изохронны окисления алюминиевого сплава $Al_5Fe_{10}Si$ с литием, при температуре 773 К.

Таблица 8 – Зависимость кажущейся энергии активации процесса окисления алюминиевого сплава Al5Fe10Si, в твердом состоянии от содержания лития, магния и церия

Содержание компонентов в сплаве Al5Fe10Si, мас.%	Кажущаяся энергия активации, кДж/моль					
	Добавка, мас.%					
	0.0	0.01	0.05	0.1	0.5	1.0
Li	178.0	143.9	133.1	126.5	115.2	106.4
Mg		153.9	148.1	140.5	133.8	126.0
Ce		164.2	156.0	148.9	142.3	134.5

Таким же образом, были исследованы кинетика окисления алюминиевого сплава Al5Fe10Si с магнием и с церием. Результаты исследования приведены в таблице 8. Видно, что при переходе от сплавов с литием к сплавам с магнием и церием окисление сплавов уменьшается, о чём свидетельствует рост величины кажущейся энергии активации сплавов.

КОРРОЗИОННО - ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА Al5Fe10Si С ЛИТИЕМ, МАГНИЕМ И ЦЕРИЕМ, В СРЕДЕ ЭЛЕКТРОЛИТА NaCl

В данном разделе представлены результаты исследования анодного поведения алюминиевого сплава Al5Fe10Si с литием, магнием и церием, в среде электролита 0.03, 0.3 и 3%-ного NaCl. Выбор исходного сплава Al5Fe10Si объясняется тем, что данный состав является эвтектическим, и структура его в основном состоит из включения эвтектики α -Al- Al₃Fe и других фаз. Сплавы эвтектического состава обладают рядом преимуществ, главным из которых является минимальное значение интервала кристаллизации и, соответственно, усадочных характеристик. Полученные в данном разделе результаты послужат научной основой для синтеза новых анодных сплавов для протекторной защиты стальных конструкций.

Исследование анодных свойств алюминиевого сплава Al5Fe10Si, легированного литием, магнием и церием, проводили с использованием потенциостата ПИ-50-1.1 и самописца ЛКД-4-002, в среде электролита NaCl марки ч.д.а. Электродом сравнения служил хлорид серебряный, а вспомогательным - платиновый. Скорость развертки потенциала составляла 2 мВ.с⁻¹. По ходу прохождения полной поляризационной кривой определяли следующие электрохимические параметры: $E_{ст}$ или $E_{св.к}$ – стационарный потенциал или потенциал свободной коррозии; $E_{рп}$ – потенциал репассивации;

$E_{\text{по}}$ – потенциал питтингообразования (или потенциал пробоя) до катодной поляризации; $E_{\text{по}}^1$ – потенциал питтингообразования после катодной поляризации; $E_{\text{кор}}$ – потенциал коррозии; $i_{\text{кор}}$ – ток коррозии. Расчет тока коррозии, как основной электрохимической характеристики процесса коррозии, проводился по катодной кривой с учетом тафеловской константы равной $b_k = 0,12\text{В}$. Скорость коррозии (K) определяли по формуле $K = i_{\text{кор}} \cdot k$, где $i_{\text{кор}}$ – плотность тока коррозии, а $k = 0,335 \text{ г/А}\cdot\text{ч}$ электрохимический эквивалент 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 $-1,1\text{В}$ для удаления оксидной плёнки с поверхности электрода (рис. 8, кривая III) в результате подщелачивания при электродной поверхности. Наконец, образцы поляризовали вновь в положительном направлении (рис. 8, кривая IV) и из анодных кривых определяли основные электрохимические параметры.

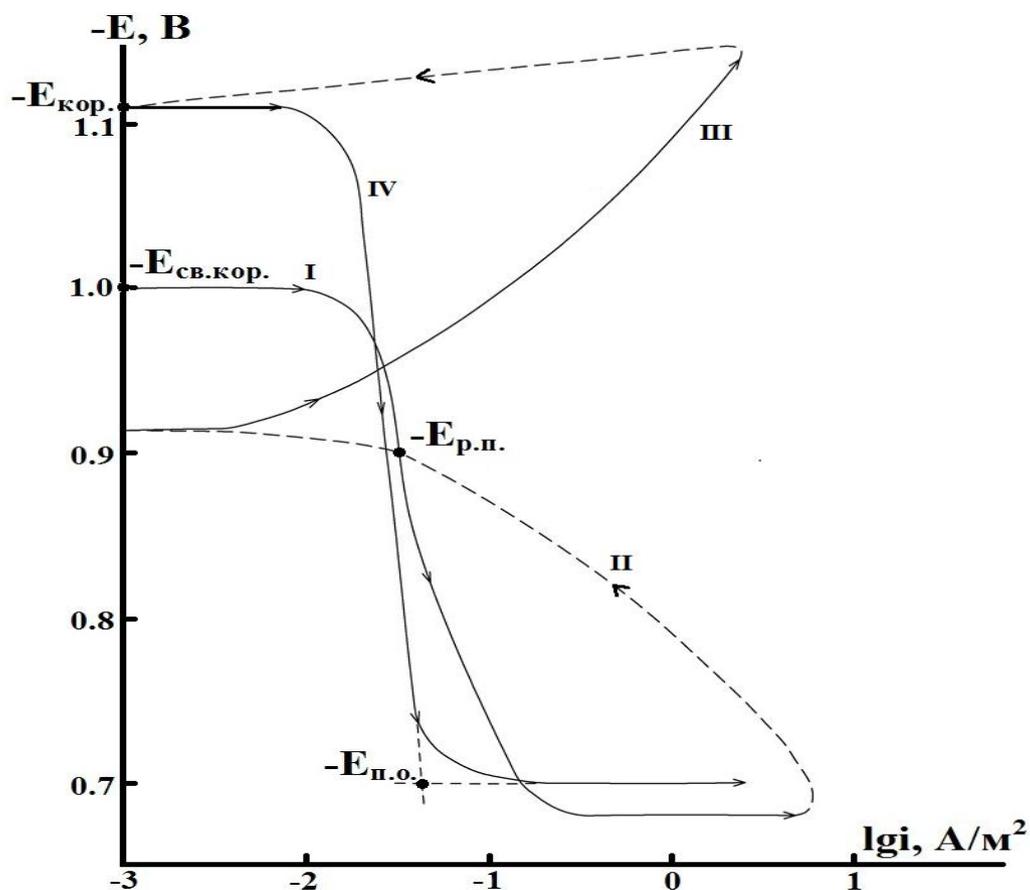


Рисунок 8 – Полная поляризационная (2мВ/с) кривая алюминниевго сплава Al5Fe10Si, в среде электролита 3%-ного NaCl.

Исследования показывают, что добавки лития в пределах 0.01-1.0 мас.% способствуют смещению потенциала свободной коррозии в положительную область во всех исследованных средах электролита NaCl. При этом потенциалы пittingобразования и репассивации также смещаются в положительную область значений (таблица 9).

Таблица 9 – Коррозионно-электрохимические характеристики алюминиевого сплава Al5Fe10Si с литием, в среде электролита NaCl

Электролит NaCl, мас.%	Содержание лития в сплаве, мас.%	Электрохимические потенциалы, В (х.с.э.)				Скорость коррозии	
		-E _{св.кор.}	-E _{кор.}	-E _{п.о.}	-E _{р.п.}	K·10 ³	I _{кор.} ·10 ²
						г/м ² ·час	А/м ²
0,03	-	0.750	0.994	0.645	0.738	3.7	12.39
	0.01	0.500	0.954	0.638	0.730	3.5	11.72
	0.05	0.490	0.948	0.626	0.724	3.2	10.72
	0.1	0.486	0.940	0.610	0.714	2.9	9.71
	0.5	0.480	0.928	0.592	0.700	2.6	8.71
	1.0	0.474	0.920	0.578	0.690	2.1	7.03
0.3	-	0.950	1.060	0.660	0.780	4.6	15.42
	0.01	0.684	0.968	0.652	0.738	3.7	12.3
	0.05	0.674	0.950	0.636	0.730	3.4	11.3
	0.1	0.644	0.944	0.620	0.718	3.0	10.05
	0.5	0.635	0.940	0.610	0.708	2.7	9.04
	1.0	0.624	0.936	0.600	0.686	2.4	8.04
3.0	-	1,000	1.110	0.700	0.900	5.8	19.43
	0.01	0.734	0.974	0.670	0.765	4.0	13.4
	0.05	0.724	0.970	0.652	0.754	3.6	12.06
	0.1	0.710	0.964	0.634	0.746	3.2	10.72
	0.5	0.700	0.958	0.618	0.730	2.8	9.38
	1.0	0.685	0.954	0.600	0.712	2.5	8.37

Скорость коррозии сплавов, содержащих 0.01-1.0% лития, почти в 1.5 раза меньше, чем у исходного алюминиевого сплава Al5Fe10Si (таблица 9). Добавки лития к сплаву Al5Fe10Si способствуют снижению скорости анодной коррозии, о чём свидетельствует смещение анодных кривых легированных сплавов в более положительную область потенциалов (рисунок 9). При этом по мере увеличения концентрации хлорид – иона в электролите NaCl скорость коррозии

сплавов увеличивается независимо от содержания легирующего компонента – лития, что сопровождается смещением в отрицательную область потенциалов коррозии, питтингообразования и репассивации.

Применительно к настоящим исследованиям следует отметить, что в целом с ростом концентрации хлорид – иона в 10 (0.03% и 0.3% NaCl) и 100 (0.03% и 3% NaCl) раз потенциал питтингообразования исходного сплава Al5Fe10Si и сплавов с литием смещаются в отрицательную область значений. Так, для исходного алюминиевого сплава Al5Fe10Si при переходе от концентрации 0.03% к 0.3% и 3% - ного NaCl $E_{п.о.}$ составляет соответственно -0.645 В, -0.660 В и 0,700 В. Аналогичным образом изменяются потенциалы свободной коррозии (стационарный потенциал) и коррозии.

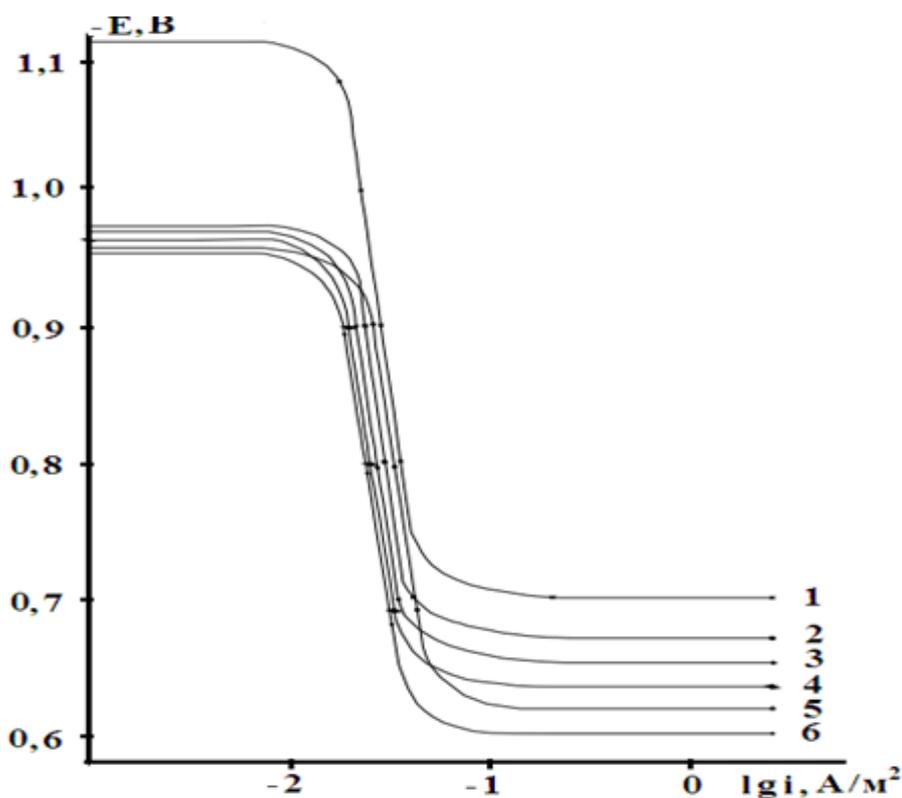


Рисунок 9 – Анодные поляризационные (2мВ/с) кривые алюминиевого сплава Al5Fe10Si (1), содержащего литий, мас. %: 0.01(2), 0.05(3), 0.1(4), 0.5(5), 1(6), в среде электролита 3.0% - ного NaCl.

Таким образом, увеличение концентрации хлорид – иона способствует росту питтинговой коррозии сплавов, о чём свидетельствует величина скорости анодной коррозии сплавов. Так, если скорость коррозии исходного сплава в среде 0.03%- ного NaCl составляет $-3.7 \cdot 10^{-2}$ А/м², то в среде 3%- ного NaCl - $5.8 \cdot 10^{-2}$ А/м² (таблица 9).

Обобщённые результаты коррозионного исследования алюминиевого сплава Al5Fe10Si с литием, магнием и церием представлены в таблицах 10 и 11.

Потенциал свободной коррозии алюминиевого сплава Al5Fe10Si с литием, магнием и церием с ростом концентрации литием, магнием и церием, изменяется в положительном направлении оси ординат. С увеличением концентрации хлорид-иона потенциал свободной коррозии сплава Al5Fe10Si уменьшается от -0.750 В, в среде 0.03 % NaCl до - 1.000 В, в среде 3 %- ного NaCl (таблица 10).

Таблица 10 – Потенциалы (х.с.э.) свободной коррозии ($-E_{\text{св.кор.}}$, В) и питтингообразования ($-E_{\text{п.о.}}$, В) сплавов систем Al5Fe10Si -Li (Mg, Ce), в среде электролита NaCl

Электролит NaCl, мас. %	Содержание лития, магния и церия в сплаве, мас. %	Сплавы с Li		Сплавы с Mg		Сплавы с Ce	
		$-E_{\text{св.кор.}}$	$-E_{\text{п.о.}}$	$-E_{\text{св.кор.}}$	$-E_{\text{п.о.}}$	$-E_{\text{св.кор.}}$	$-E_{\text{п.о.}}$
0.03	-	0.750	0.645	0.750	0.645	0.750	0.645
	0.01	0.500	0.638	0.474	0.610	0.524	0.520
	0.05	0.490	0.626	0.470	0.590	0.500	0.500
	0.1	0.486	0.610	0.464	0.570	0.480	0.500
	0.5	0.480	0.592	0.455	0.560	0.475	0.490
	1.0	0.474	0.578	0.445	0.540	0.465	0.470
0.3	-	0.950	0.660	0.950	0.660	0.950	0.660
	0.01	0.684	0.652	0.644	0.640	0.720	0.550
	0.05	0.674	0.636	0.640	0.630	0.700	0.538
	0.1	0.644	0.620	0.635	0.610	0.680	0.520
	0.5	0.635	0.610	0.630	0.590	0.670	0.500
	1.0	0.624	0.600	0.625	0.580	0.644	0.500
3.0	-	1,000	0.700	1,000	0.700	1,000	0.700
	0.01	0.734	0.670	0.812	0.678	0.830	0.570
	0.05	0.724	0.652	0.790	0.670	0.814	0.564
	0.1	0.710	0.634	0.770	0.654	0.755	0.560
	0.5	0.700	0.618	0.762	0.650	0.716	0.550
	1.0	0.685	0.600	0.750	0.650	0.708	0.535

Величины потенциалов питтингообразования и репассивации сплава Al5Fe10Si с Li, Mg, Ce, также по мере роста концентрации хлорид-иона в электролите изменяются в более отрицательном направлении оси ординат. Увеличение концентрации легирующего компонента способствует росту величины потенциалов питтингообразования и репассивации во всех средах

независимо от концентрации хлорид-иона. Установленные зависимости характерны для сплава Al5Fe10Si с Li, Mg, Ce. При переходе от сплавов с литием к сплавам с магнием и церием потенциалы свободной коррозии и питтингообразования растут, т.е. изменяются в положительном направлении оси ординат (таблица 10).

Плотность тока коррозии и соответственно скорость коррозии алюминиевого сплава Al5Fe10Si с литием, магнием и церием с ростом концентрации хлорид-иона увеличивается. Данная зависимость характерна для всех сплавов независимо от их состава и особенностей физико-химических свойств легирующего компонента. При переходе от сплава Al5Fe10Si с литием к сплавам с магнием и церием наблюдается увеличение скорости коррозии, что не коррелирует со свойствами самих металлов (таблица 11).

Таблица 11 – Зависимость скорости коррозии сплава Al5Fe10Si с литием, магнием и церием, в среде электролита NaCl

Электролит NaCl, мас.%	Содержание лития, магния и церия в сплаве, мас.%	Скорость коррозии					
		сплавов с Li		сплавов с Mg		сплавов с Ce	
		$i_{кор.} \cdot 10^2$ А/м ²	$K \cdot 10^3$ г/м ² ·час	$i_{кор.} \cdot 10^2$ А/м ²	$K \cdot 10^3$ г/м ² ·час	$i_{кор.} \cdot 10^2$ А/м ²	$K \cdot 10^3$ г/м ² ·час
0.03	-	3.7	12.39	3.7	12.39	3.7	12.39
	0.01	3.5	11.72	3.3	11.05	3.6	12.06
	0.05	3.2	10.72	3.1	10.38	3.4	11.39
	0.1	2.9	9.71	2.7	9.04	3.0	10.05
	0.5	2.6	8.71	2.4	8.04	2.8	9.38
	1.0	2.1	7.03	2.2	7.37	2.5	8.37
0.3	-	4.6	15.42	4.6	15.42	4.6	15.42
	0.01	3.7	12.30	4.1	13.73	4.2	14.07
	0.05	3.4	11.30	3.7	12.39	3.9	13.06
	0.1	3.0	10.05	3.3	11.05	3.6	12.06
	0.5	2.7	9.04	3.0	10.05	3.3	11.05
	1.0	2.4	8.04	2.7	9.04	3.1	10.38
3.0	-	5.8	19.43	5.8	19.43	5.8	19.43
	0.01	4.0	13.40	4.5	15.0	5.5	18.42
	0.05	3.6	12.06	4.2	14.07	5.2	17.42
	0.1	3.2	10.72	3.9	13.06	4.8	16.08
	0.5	2.8	9.38	3.6	12.06	4.6	15.07
	1.0	2.5	8.37	3.5	11.72	4.1	13.73

Таким образом, установлено, что легирование литием, магнием и церием сплава Al5Fe10Si до 1.0 мас.% повышает его анодную устойчивость на 1,5 раза, в среде электролита NaCl. При этом с ростом концентрации легирующего компонента отмечается изменение в положительном направлении оси ординат потенциалов свободной коррозии, питтингообразования и репассивации. С увеличением концентрации хлорид-иона в электролите потенциалы свободной коррозии, питтингообразования и репассивации сплавов уменьшаются, скорость коррозии увеличивается.

ВЫВОДЫ

1. В режиме «охлаждения» исследована температурная зависимость теплоемкости алюминиевого сплава Al5Fe10Si, легированного литием, магнием и церием. Показано, что с ростом концентрации легирующего компонента и температуры теплоемкость сплавов увеличивается. При переходе от сплавов с литием к сплавам с магнием и церием величина теплоёмкости сплавов незначительно уменьшается.

2. Исследованиями температурных зависимостей изменений термодинамических функций сплава Al5Fe10Si, легированного литием, магнием и церием показано, что при переходе от сплавов с литием к сплавам магнием и церием величины энтальпии и энтропии уменьшаются. С ростом температуры энтальпия и энтропия сплавов растут, а значения энергии Гиббса уменьшается.

3. Методом термогравиметрии исследована кинетика окисления сплава Al5Fe10Si, легированного литием, магнием и церием. Установлено, что окисление сплавов подчиняется гиперболическому закону с истинной скоростью окисления порядка $K \cdot 10^{-4}$, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Выявлено, что самые минимальные значения кажущейся энергии окисления относятся к сплаву Al5Fe10Si с литием, а максимальные к сплавам с церием.

4. Потенциостатическим методом в потенциодинамическом режиме со скоростью развёртки потенциала 2 мВ/с, исследовано анодное поведение алюминиевого сплава Al5Fe10Si, легированного литием, магнием и церием. Показано, что добавки легирующих компонентов в пределах 0,01 ÷ 1,0 мас.%, в 1,5 раз повышают коррозионную стойкость алюминиевого сплава Al5Fe10Si, в среде электролита NaCl.

5. Исследованием влияния хлорид-иона на электрохимические характеристики алюминиевого сплава Al5Fe10Si с литием, магнием и церием установлено, что снижение его концентрации способствует уменьшению скорости коррозии сплавов и сдвигу электродных потенциалов в более положительную область.

6. На основании выполненных исследований разработаны составы новых сплавов и защищены двумя малыми патентами Республики Таджикистан. Сплавы рекомендуются в качестве анодного материала для защиты от коррозии стальных сооружений и конструкции от электрохимической коррозии.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ:

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

1. **Бокиев, Л.А.** Влияние лития на коррозионно-электрохимическое поведение алюминиевого сплава АЖ5К10, в среде электролита NaCl / Л.А. Бокиев, И.Н. Ганиев, Н.И. Ганиева, А.Х. Хакимов, У.Ш. Якубов // Вестник Тверского государственного университета. Серия: Химия, 2019. -№3.(37), - С. 79-89.
2. **Бокиев, Л.А.** Анодное поведение алюминиевого сплава АЖ5К10 с церием, в среде электролита NaCl / Л.А. Бокиев, И.Н. Ганиев, А.Х. Хакимов, Р.Х. Саидзода // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1: Естественные и технические науки, 2019-№4. -С. 73-78.
3. **Бокиев, Л.А.** Влияние магния на анодное поведение алюминиевого сплава АЖ5К10, в среде электролита NaCl / Л.А. Бокиев, И.Н. Ганиев, А.Х. Хакимов, Х.Х. Азимов // Вестник СибГИУ, 2019. -№4.(30), -С. 45-50
4. **Бокиев, Л.А.** Кинетика окисления алюминиевого сплава АЖ5К10 с магнием / Бокиев, И.Н. Ганиев, А.Х. Хакимов, Дж.Х. Джайлоев, У.Ш. Якубов // Вестник Тверского государственного университета. Серия: Химия, 2020. -№2.(40), -С. 79-89.
5. **Бокиев, Л.А.** Кинетика окисления алюминиевого сплава АЖ5К10 с церием / Л.А. Бокиев, И.Н. Ганиев, А.Х. Хакимов, Дж.Х. Джайлоев, У.Ш. Якубов // Вестник Казанского государственного технологического университета им. А.Н. Туполева. 2020. - Т.23. -№8. -С. 35-38.

Изобретения по теме диссертации

6. Малый патент Республики Таджикистан № ТЈ 860, МПК С22С 21/00. Протекторный сплав на основе алюминия / **Л.А. Бокиев**; заявитель и патентообладатель: И.Н. Ганиев, Якубов У.Ш., Сангов М.М., Джураева М.Ш. / №1701120; заявл.01.06.17; опубл. 01.12.17.
7. Малый патент Республики Таджикистан № ТЈ 1004, МПК С22С 21/00. Протекторный сплав на основе алюминия / **Л.А. Бокиев**; заявитель и патентообладатель: И.Н. Ганиев, Хакимов А.Х., Сафаров А.Г., Якубов У.Ш., Ганиева Н.И., Джайлоев Дж.Х. / №1901275; заявл.25.01.19; опубл. 14.06.19.

Статьи, опубликованные в материалах международных и республиканских конференций:

8. **Бокиев Л.А.** Кинетика окисления алюминиевого сплава АЖ5К10 с литием / Л.А. Бокиев, И.Н. Ганиев, А.Х. Хакимов, Н.И. Ганиева // Мат. Республиканской научно-практической конференции «Актуальные проблемы индустриализации Республики Таджикистан: проблемы и стратегии» Част 1. (ТУТ, Душанбе, 26-27 апреля), 2019.– С. 22-25.

9. **Бокиев Л.А.** Потенциал свободной коррозии алюминиевого сплава АЖ5К10 с литием в среде электролита NaCl / Л.А. Бокиев, И.Н. Ганиев, А.Х. Хакимов, У.Ш. Якубов // в сборнике: вопросы физической и коллоидной химий. Мат. IV Международной конференции, посвященной памяти докторов химических наук, профессоров Хамида Мухсиновича Якубова и Зухуриддина Нуриддиновича Юсуфа.– 2019.– С. 107-111.

10. **Бокиев Л.А.** Влияние хлорид-иона на потенциал коррозии сплава АЖ5К10, легированного магнием / Л.А. Бокиев, И.Н. Ганиев, Дж.Х. Джайлоев, М.Ш. Джураева // Сб. матер. XIII Нумановские чтения «Достижения химической науки за 25 лет государственной независимости Республики Таджикистан», посв. 70-летию образования Института химии. Институт химии им. В.И. Никитина АН Республики Таджикистан.– 2016.– С. 119-121.

11. **Бокиев Л.А.** Влияние лития на потенциал свободной коррозии сплава АЖ5К10 / Л.А. Бокиев, И.Н. Ганиев, Дж.Х. Джайлоев, Х.Х. Азимов, У.Ш. Якубов // Мат. Респ. научно-практической конференции «Проблемы материаловедения в Республики Таджикистан», посв. «Дню химика» и 80-летию со дня рождения доктора технических наук, профессора, академика Международной инженерной академии Вахобова Анвара Вахобовича. 2016. – С. 113-114.