

**НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК ТАДЖИКИСТАНА
ГНУ «Институт химии им. В.И. Никитина»**

На правах рукописи

РАХМАТУЛЛОЕВА Гулноза Мухриевна

**ВЛИЯНИЕ ЩЕЛОЧНЫХ МЕТАЛЛОВ НА
ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
АЛЮМИНИЕВОГО ПРОВОДНИКОВОГО СПЛАВА AlTi0.1**

**Научная специальность
2.6.17 – Материаловедение (технические науки)**

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

Душанбе – 2026

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

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

Официальные оппоненты: **Умарова Татьяна Мухсиновна** - доктор
технических наук, доцент, главный
специалист отдела науки, инноваций,
международных связей и издательской
деятельности филиала Московского
государственного университета имени М.В.
Ломоносова в городе Душанбе

Ходжаев Фируз Камолович - кандидат
технических наук, доцент кафедры
«Металлургия» Таджикского технического
университета имени академик М.С. Осими

Ведущая организация: Кафедра «Общая физика и твёрдого тела»
Худжандского государственного университета
имени академика Бободжона Гафурова

Защита состоится: «29» июня 2026 г. в 10³⁰ часов на заседании
диссертационного совета 73.1.002.02 при ГНУ «Институте химии им.
В.И. Никитина Национальной академии наук Таджикистана» по адресу:
Республика Таджикистан, 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.chemistry.tj

Автореферат разослан « _____ » _____ 2026 года

Учёный секретарь
диссертационного совета,
кандидат химических наук

Халикова Л.Р.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Алюминий по электропроводности среди металлов занимает четвертое место после золота, серебра и меди. Электропроводность отожженного алюминия составляет приблизительно 62% электропроводности отожженной стандартной меди, но благодаря малому удельному весу алюминий имеет проводимость на единицу массы в 2 раза большую, чем медь. Именно это дает основание об экономической выгоды применения алюминия в качестве материала для проводников. При равной проводимости (на одной и той же длине) алюминиевый проводник имеет площадь поперечного сечения на 60% большую, чем медный, а масса его составляет только 48% массы меди. Однако вышеперечисленные традиционные подходы не позволяют, сохранив приемлемый уровень электропроводности, одновременно значительно повысить прочность алюминиевых проводников, приблизив ее к уровню медных материалов, а также увеличить температуру эксплуатации.

Материалы электротехнического назначения должны сочетать высокую электропроводность, прочность, износостойкость, коррозионную стойкость, сохраняющиеся при повышенных температурах. Поскольку температура начала рекристаллизации нелегированного алюминия ниже 250 °С, то электротехнический алюминий типа А5Е, А7Е не отвечает требованиям потребителей по механическим свойствам. Реализуемая на рынках электротехническая катанка из сплава марки АВЕ, легированного небольшими добавками кремния и магния, имеет повышенные прочностные характеристики, но недостаточную электропроводность.

Из-за низкой механической прочности в ряде случаев в электротехнике использование в качестве проводника алюминия затруднено или просто невозможно. Легирование другими металлами алюминия можно повысить его механическую прочность. В этом ряду особое место отводится сплавам алюминия с различными добавками.

Провода, созданные из марки А5Е и А7Е не удовлетворяют данным требованиям, поскольку они сильно разупрочняются даже после кратковременных нагревов до 100 °С. Для решения данной проблемы наиболее перспективным является создание проводов, изготовленных из низколегированного алюминиевого сплава с добавкой титана. Так как данный элемент значительно повышает термостойкость алюминия, другими словами, повышает температуру рекристаллизации.

Влияние различных легирующих элементов на электропроводность и прочность алюминия показали, что наибольший рост твердости отмечается при введении малорастворимых легирующих элементов: Fe, Zr, Mn, Cr, Ti, Ca и Mg. Эти элементы существенно отличаются по атомным диаметрам от алюминия. Так как электропроводность является основным параметром проводникового материала, то легирующие элементы следует выбирать с учетом их влияния на изменения электропроводности.

Степень разработанности темы. В современном мире область применения щелочных металлов чрезвычайно велика. Щелочные металлы широко используются в современной науке и технике. Такое широкое применение эти элементы (Li, Na, K, Rb и Cs) получили благодаря уникальному сочетанию физико химических свойств, таких как низкие плотности и вязкости, высокие температуры плавления, изменяющиеся в диапазоне от 301,59 К (Cs) до 453,69 К (Li) при нормальном атмосферном давлении, широкий диапазон температур в жидком состоянии, высокие значения температуры испарения от 943 К (Cs) до 1615 К (Li), высокую тепло- и электропроводность и многие другие свойства. Так, например, щелочные металлы являются незаменимыми элементами в атомной энергетике, а также в термоядерных реакторах, где щелочные металлы применяют в качестве охладителей.

Получение достоверных экспериментальных сведений о различных свойствах алюминиевого сплава AlTi0.1 с Li, Na и K позволяют разработать новые сплавы электротехнического назначения.

Цель работы заключается в экспериментальном исследовании физико-механических и химических свойств алюминиевого проводникового сплава AlTi0.1 с щелочными металлами (Li, Na, K), для разработки составов новых сплавов.

Задачи исследования:

- изучить влияние добавок щелочных металлов (Li, Na, K) на изменение структуры и механических свойств алюминиевого сплава AlTi0.1;
- определить температуру зависимость изменения теплоёмкости и термодинамических функций (энтальпия, энтропия, энергия Гиббс) алюминиевого проводникового сплава AlTi0.1 с щелочными металлами;
- исследовать кинетику окисления алюминиевого проводникового сплава AlTi0.1 с литием, натрием, калием и определить механизмы его окисления;
- изучить фазовый состав продуктов окисления тройных сплавов;
- провести измерения удельной электропроводимости сплавов при комнатной температуре;
- определить концентрационную зависимость изменений анодных характеристик алюминиевого проводникового сплава AlTi0.1 с щелочными металлами и выявить влияние концентрации хлорид-иона на коррозионную стойкость сплавов в коррозионной среде NaCl.

Методы исследования и использованная аппаратура:

- метод металлографии для проведения микроструктурного анализа сплавов (микроскоп KPL 3230-2K);
- метод Бринелля для определения твёрдости металлов (твёрдомер HBRV-187.5D);
- метод исследования теплоёмкости сплавов в режиме «охлаждения» с использованием автоматической регистрации температуры образца от времени охлаждения;

- метод измерения удельной электропроводимости при комнатной температуре (ВЭ-27НЦ);
- метод термогравиметрии для изучения кинетики окисления сплавов;
- рентгенофазовый анализ продуктов окисления сплавов (ДРОН-3);
- потенциостатический метод для изучения анодных свойств сплавов (прибор ПИ 50-1.1).

Научная новизна заключается в том, что в работе впервые:

- методом металлографии показано, что добавка лития, натрия и калия, от 0,01 до 0,5 мас. % значительно измельчают структурные составляющие алюминиевого проводникового сплава AlTi0.1;

- стандартными методами измерения (метод Бринелля) твёрдости металлов показано, что добавка до 0,5 мас. % щелочных металлов (Li, Na, K) увеличивают твёрдость и прочность сплава AlTi0.1;

- в режиме «охлаждения» по известной теплоемкости эталонного образца из алюминия марки А5N установлена теплоемкость алюминиевого проводникового сплава AlTi0,1 с щелочными металлами. В результате математической обработки получены полиномы, описывающие температурную зависимость теплоемкости и изменений термодинамических функций вышеуказанных сплавов в интервале температур 300-800К. С помощью полученных зависимостей показано, что с ростом содержания лития, натрия и калия теплоемкость сплавов незначительно увеличивается, а значение энергии Гиббса уменьшается. Изменение теплоемкости сплава AlTi0,1 от содержания лития, натрия и калия объясняется ростом степени гетерогенности структуры сплавов при их модифицировании указанными металлами. Рост изменений термодинамических функций сплавов от температуры связан с увеличением энергии колебаний кристаллической решетки сплава AlTi0,1 с литием, натрием и калием;

- методом термогравиметрии показано, что с ростом температуры и содержания лития, натрия и калия в алюминиевом проводниковом сплаве AlTi0.1 скорость его окисления незначительно увеличивается. Установлены закономерности изменения кинетических характеристик процесса окисления сплавов, в твёрдом состоянии, в воздушной среде;

- методом рентгенофазового анализа определено, что при окислении исследованных сплавов образуются простые оксиды и оксиды типа шпинелей: Al₂O₃, Ti₃O₅, TiO₂, Li_{2.03}Ti_{3.43}O₈, Na₂Al₂₂O₃₄, Al_{21.86}K_{2.59}O₃₄. Установлена роль модифицирующих элементов в формировании фазового состава продуктов окисления и механизма процесса окисления сплавов;

- потенциостатическим методом в потенциодинамическом режиме при скорости развертки потенциала 2 мВ/с показано, что добавка щелочного металла (Li, Na, K) в сплав AlTi0.1 способствует смещению потенциалов свободной коррозии, питтингообразования и репассивации в положительную область значений, а скорость коррозии при введении 0,01–0,5 мас.% Li, Na и K снижается на 10–20 %. С ростом концентрации хлорид-иона в электролите NaCl

отмечен рост скорости коррозии сплавов и смещение электрохимических потенциалов в область отрицательных значений.

Практическая значимость работы. Установлены оптимальные концентрации лития, натрия и калия в алюминиевом проводниковом сплаве AlTi0.1. Разработаны составы новых материалов, которые защищены малым патентом Республики Таджикистан ТЖ № 1443. Результаты работы могут быть использованы в радиоэлектронике, вычислительной технике, электротехнике и при разработке методов и технологий получения новых сплавов.

Основные положения, выносимые на защиту:

- результаты микроструктурного анализа и исследования механических свойств алюминиевого проводникового сплава AlTi0.1 с литием, натрием и калием;
- результаты исследования температурных зависимостей теплоёмкости и изменений термодинамических функции алюминиевого проводникового сплава AlTi0.1 с литием, натрием и калием;
- закономерности изменения кинетических параметров процесса окисления алюминиевого проводникового сплава AlTi0.1 с литием, натрием и калием;
- результаты исследований продуктов окисления сплавов, установление их роли в процессе окисления и механизме окисления сплавов в твёрдом состоянии;
- зависимость анодных характеристик и скорость коррозии алюминиевого проводникового сплава AlTi0.1 с литием, натрием и калием в среде электролита NaCl;
- установленные оптимальные концентрации лития, натрия и калия как модифицирующего компонента, улучшающие коррозионную стойкость алюминиевого проводникового сплава AlTi0.1.

Личный вклад автора заключается в сборе и анализе литературных источников по теме исследования, определении целей, формулировании задач исследования, определении методов исследования и в проведении экспериментальных исследований, в обработке и анализе полученных данных, написании статей, формулировке положений и выводов, оформлении диссертационной работы.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов обеспечивается применением современных методов исследования, необходимым и достаточным количеством экспериментального материала для корректной статистической обработки, сопоставлением полученных результатов с данными других авторов, совпадением теоретических расчетов и экспериментально полученных результатов.

Основные положения работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы развития текстильной промышленности Республики Таджикистан в период ускоренной индустриализации», Таджикский технический университет им. акад. М.С. Осими (Душанбе, 2024);

Республиканской научно-практической конференции «Современные проблемы физики конденсированного состояния», ХГУ имени акад. Б. Гафуров (Худжанд, 2024); II Международной научной конференции «Инновационное развитие науки», Центр по исследованию инновационных технологий Национальной академии наук Таджикистана (Душанбе, 2022); Республиканской научно-практической конференции, «Посвященной двадцатилетию изучения и развития естественных, точных и математических наук», Российско-Таджикского (Славянского) университет (Душанбе, 2022); Республиканской научно-практической конференции «Фундаментальная наука - основа совершенствования технологий и материалов», посвященной 30-летию Государственной независимости Республики Таджикистан, Центр исследования инновационных технологий при НАН Таджикистана (Душанбе, 2021).

Соответствие паспорту специальности. Тема соответствует пункту 1 «Разработка новых металлических, неметаллических и композиционных материалов в том числе, капиллярно-пористых, с заданным комплексом свойств путем установления фундаментальных закономерностей влияния дисперсности, состава, структуры технологий, а также эксплуатационных и иных факторов на функциональные свойства материалов»; пункт 2 «Установление закономерностей физико-химических и физико-механических процессов, происходящих в гетерогенных и композиционных структурах»; пункт 3 «Разработка научных основ выбора металлических, неметаллических и композиционных материалов с заданными свойствами применительно к конкретным условиям изготовления и эксплуатации деталей, изделий машин и конструкций»; пункт 4 «Разработка физико-химических и физико-механических процессов формирования новых металлических, неметаллических и композиционных материалов»; пункт 10 «Разработка способов повышения коррозионной стойкости металлических, неметаллических и композиционных материалов в различных условиях эксплуатации».

Публикации. По результатам исследований опубликовано 19 научных работ, из них 9 в журналах, рекомендованных ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, 10 в материалах конференций. Получен 1 малый патент Республики Таджикистан ТД № 1443 и на основе этого патента автором получен акт опытно-промышленного испытания сплавов в ГУП «Коргохи машинасози».

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и приложения, изложена на 152 страницах компьютерного набора, включает 61 рисунок, 46 таблиц, 153 библиографических наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель и задачи исследования, изложена научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, приведены защищаемые положения.

В первой главе представлен аналитический обзор литературы по теме исследования. Описаны использование алюминия и его сплавов в электротехнике; теплоёмкость алюминия, титана и щелочных металлов; особенности окисления алюминия и его сплавов с щелочными металлами; коррозионно-электрохимическое поведение сплавов алюминия с титаном и щелочными металлами. Однако в литературе отсутствует информация о термодинамических, кинетических и анодных характеристиках алюминиевого проводникового сплава AlTi0.1 с литием, натрием и калием.

Во второй главе представлены материалы и методики исследования физико-механических и химических свойств сплава AlTi0.1 с литием, натрием и калием. В частности, описан метод металлографии для проведения микроструктурного анализа сплавов; метод Бринелля для определения твёрдости металлов; метод исследования теплоёмкости сплавов в режиме «охлаждения» с использованием автоматической регистрации температуры образца от времени охлаждения; метод термогравиметрии для изучения кинетики процесса окисления металлов и сплавов; рентгенофазовый анализ продуктов окислений сплавов и потенциостатический метод для изучения анодных свойств сплавов.

ГЛАВА 3. МЕХАНИЧЕСКИЕ, ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АЛЮМИНИЕВОГО ПРОВОДНИКОВОГО СПЛАВА AlTi0.1 С ЩЕЛОЧНЫМИ МЕТАЛЛАМИ

В настоящее время во многих областях техники вырос интерес к термостойким материалам на основе алюминиевых сплавов. Наряду с электротехникой их применяют для изготовления термостойких проводов высоковольтных воздушных линий электропередач.

Одним из важных параметров, влияющих на механические свойства сплавов является микроструктура материалов. Изменяя микроструктуру, расположение элементов в пространстве, их размеры, а также фазовый состав можно добиться значительных изменений в свойствах материалов. Из-за этого изучение микроструктуры и способов влияния на них находится в фокусе исследователей материаловедения. В ходе этой работы определили уровень влияния щелочных металлов (Li, Na, K) на структурное строение сплава AlTi0.1 и вследствие этого изменения в механических свойствах. Для этого использовали лабораторный микроскоп марки КР-L3230-2К, который позволяет исследовать микроструктуру металлов и сплавов. Полученные изображения микроструктуры синтезированных сплавов приведены на рисунках 1-3. Данные изображения получены при увеличении $\times 500$. При добавлении 0,01-0,5% щелочных металлов, наблюдается измельчение структуры проводникового сплава AlTi0.1.

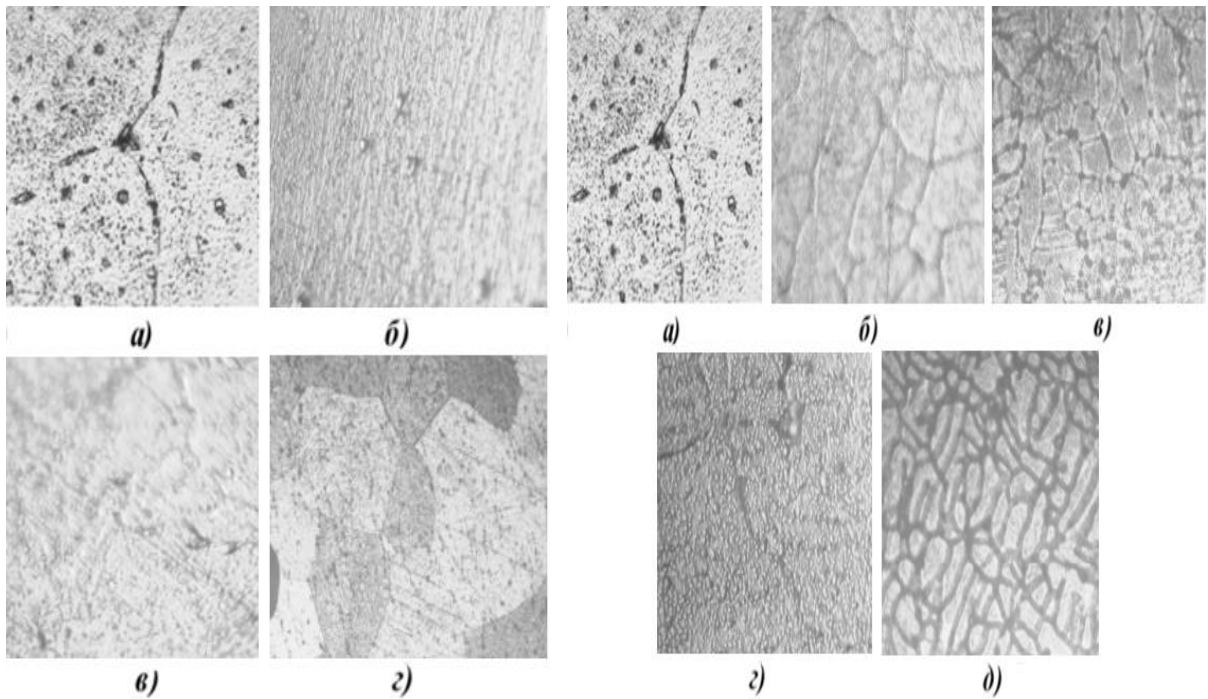


Рисунок 1. Микроструктуры (x500) сплава AlTi0.1(а) с литием, мас. %: 0,01(б); 0,1(в); 0,5(г)

Рисунок 2. Микроструктуры (x500) сплава AlTi0.1(а) с натрием, мас. %: 0,01(б); 0,05(в); 0,1(г); 0,5(д)

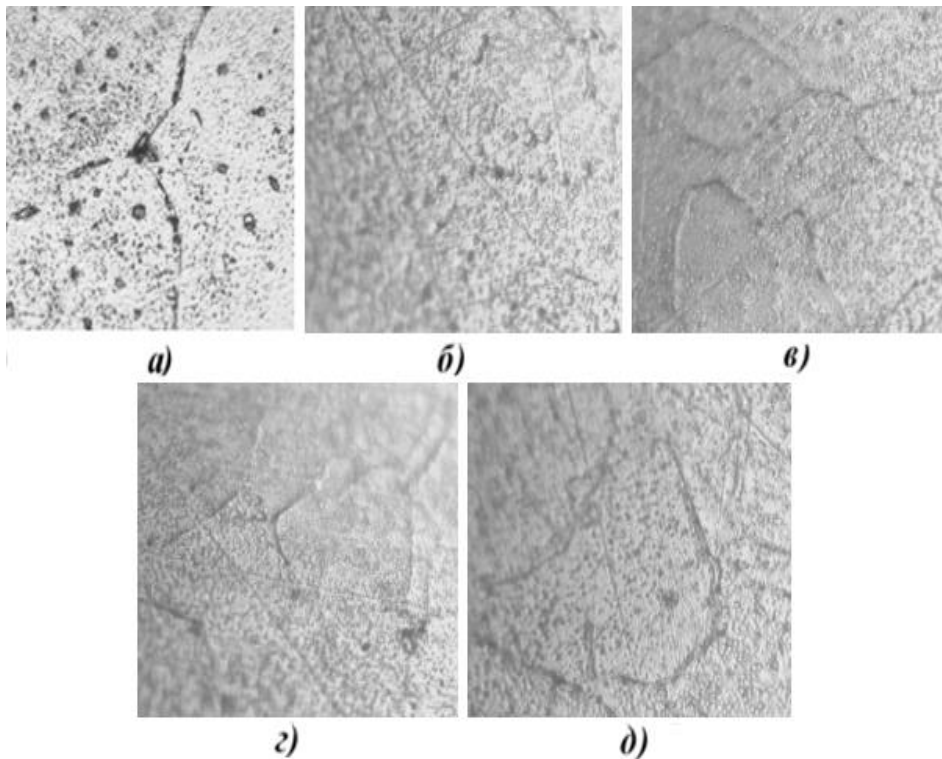


Рисунок 3. Микроструктуры (x500) алюминиевого проводникового сплава AlTi0.1(а), содержащего калий, мас. %: 0,01(б); 0,05(в); 0,1(г); 0,5(д)

Одним из широко распространенных видов механических испытаний металлических сплавов является измерение твёрдости. Так как большинство свойств металлических сплавов определяется их структурой, по значению твёрдости можно сделать предварительные выводы о других механических

свойствах сплава. Измерение твёрдости позволяет сделать выводы о наличии или отсутствии в деталях упрочненных поверхностей в результате различных видов термической обработки сплавов, связанных с изменением структуры по сечению детали.

Существует способ, который с помощью расчётов позволяет получить значения прочности на основе результатов измерения твёрдости по Бринеллю. Это можно реализовать с помощью, следующей формулы: $\sigma_B = k \cdot HB$

Значение «k» для алюминиевых сплавах равно 0,35. С учётом этого пересчитано значение σ_B для исследуемых сплавов. Результаты расчетов представлены в таблице 1. При добавке лития, натрия и калия твердость и прочность исходного сплава AlTi0.1 повышается. При переходе от сплава с литием к сплаву с натрием, далее к сплаву с калием твердость и прочность уменьшается.

Таблица 1. Твёрдость и прочность сплава AlTi0.1 с щелочными металлами

Содержание Li, Na и K в сплаве, мас. %	Твердость HB, МПа	Прочность, МПа
0.0	177,66	44,41
0.01 Li	193,55	48,39
0.05 Li	199,14	49,78
0.1 Li	222,19	55,54
0.5 Li	269,38	67,34
0.01 Na	191,79	47,95
0.05 Na	195,42	48,85
0.1 Na	213,17	53,29
0.5 Na	247,21	61,80
0.01 K	186,49	46,62
0.05 K	190,02	47,50
0.1 K	209,54	52,39
0.5 K	237,50	59,37

В таблице 2 приведены измерения удельной электропроводимости проводникового сплава AlTi0.1 с щелочными металлами. Измерения проводились при комнатной температуре с помощью прибора ВЭ-27НЦ. Результаты показали, что при добавлении лития удельная электропроводимость проводникового сплава AlTi0.1 уменьшается, а при добавлении натрия и калия незначительно увеличивается.

Таблица 2. Результаты измерения удельной электропроводимости алюминиевого проводникового сплава AlTi0.1 с щелочными металлами

Содержание Li, Na и K в сплаве, мас. %	1-раз	2-раз	3-раз	4-раз	Средние значения	Мсм/м
AlTi0,1	33,8	34	34,5	34,4	34,175	32 ÷ 34
0,01Li	28,5	30	28,9	30,1	29,375	28 ÷ 30
0,05Li	28,6	28,6	28,6	28,8	28,65	28 ÷ 29
0,1Li	28,3	28,4	28,7	28,8	28,55	28 ÷ 29
0,5Li	22,1	21,8	21,7	21,7	21,825	20 ÷ 21
0,01Na	35	34	34	35,1	34,525	33 ÷ 35
0,05Na	35,1	34,6	34,1	34,4	34,55	34 ÷ 35
0,1 Na	33,9	35,8	32,9	35,9	34,625	32 ÷ 35
0,5Na	34,9	34,5	35,1	34,1	34,65	34 ÷ 35
0,01K	34,2	34	33,1	35	34,075	34 ÷ 35
0,05K	33,9	33,7	33,6	35,2	34,1	33 ÷ 35
0,1K	31,9	34,5	34,8	35,6	34,2	31 ÷ 35
0,5K	33,9	34,4	33,8	35,4	34,375	33 ÷ 35

Представлены результаты исследования температурной зависимости удельной теплоёмкости и изменений термодинамических функций алюминиевого проводникового сплава AlTi0.1 с литием. Полученные графики от температуры (Т) и времени охлаждения (τ) для образцов из алюминиевого сплава AlTi0.1 с литием показывают непрерывное уменьшение температуры образцов и эталона по мере их охлаждения (рисунок 4а). На кривых охлаждения термических эффектов, связанных с фазовым превращением или переходом, не обнаружено.

Полученные кривые охлаждения образцов из сплавов описываются уравнением вида

$$T = ae^{-b\tau} + pe^{-k\tau}, \quad (1)$$

где a, b, p, k – постоянные для данного образца, τ – время охлаждения.

Дифференцируя уравнение (2) по τ , получаем уравнение для определения скорости охлаждения образцов

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

По формуле (2) вычислены скорости охлаждения образцов из алюминиевого сплава AlTi0.1 с литием и эталона. Кривые скорости охлаждения (рисунок 4б) рассчитаны через 100К. Обработкой скоростей охлаждения образцов получены значения коэффициентов a, b, p, k, ab, pk в (3), которые приведены в таблице 3.

С использованием установленных скоростей охлаждения образцов по уравнению (2) вычислялась удельная теплоемкость алюминиевого сплава AlTi0.1 с литием и эталона. Результаты измерения через 100 К представлены в таблице 3 и на рисунке 5а. Теплоемкость алюминиевого сплава AlTi0.1 с ростом температуры и концентрации лития увеличивается.

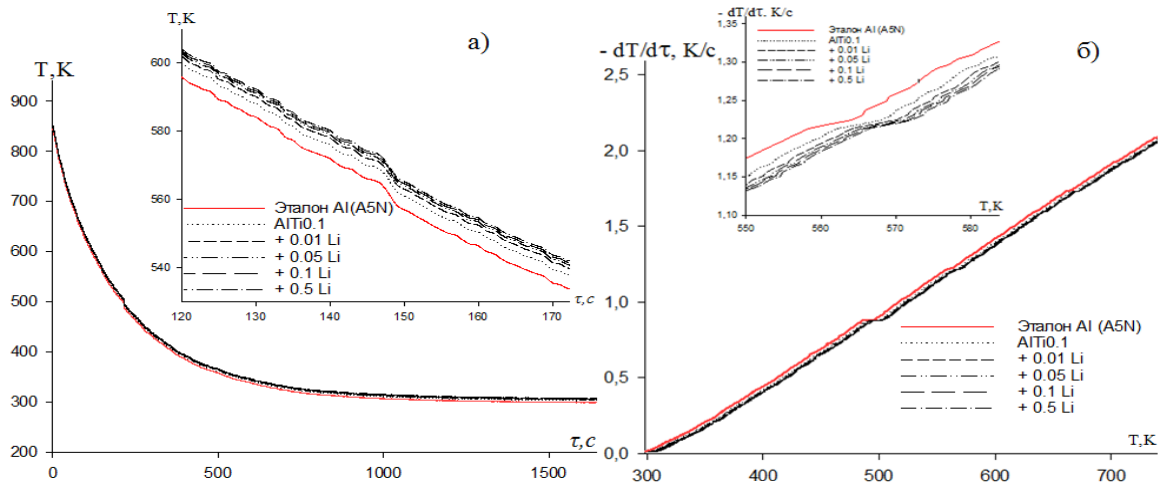


Рисунок 4. Температурная зависимость времени охлаждения (а) и скорости охлаждения (б) для образцов из сплава AlTi0.1 с литием и эталона (Al марки А5N)

Таблица 3. Значения коэффициентов a , b , p , k , ab , pk в уравнении (2) для алюминиевого проводникового сплава AlTi0.1 с литием и эталона (Al А5N)

Содержание лития в сплаве, мас. %	a , К	$b \cdot 10^{-3}$, c^{-1}	p , К	$k \cdot 10^{-4}$, c^{-1}	$a \cdot b$, $K \cdot c^{-1}$	$p \cdot k \cdot 10^{-2}$, $K \cdot c^{-1}$
0.0	512,05	4,82	316,42	2,96	2,47	9,35
0.01	512,06	4,82	318,43	2,94	2,47	9,35
0.05	512,07	4,82	319,44	2,93	2,47	9,35
0.1	512,08	4,82	320,03	2,92	2,47	9,35
0.5	512,09	4,82	320,63	2,91	2,47	9,35
Эталон	512,09	4,82	312,44	2,99	2,47	9,36

Таблица 4. Теплоемкость (Дж/(кг·К)) алюминиевого проводникового сплава AlTi0.1 с литием и эталона (Al марки А5N)

Содержание лития в сплаве, мас. %	T, К					
	300	400	500	600	700	800
0.0	903,33	949,02	991,11	1035,03	1086,25	1150,27
0.01	903,59	949,67	992,26	1036,85	1088,93	1153,90
0.05	904,66	950,98	993,63	1038,11	1089,89	1154,48
0.1	905,99	952,36	995,03	1039,57	1091,55	1156,57
0.5	916,73	964,77	1008,06	1052,49	1103,99	1168,46
Эталон	903,70	949,58	991,97	1036,35	1088,21	1153,00

При проведении регрессии получено следующее общее уравнение, описывающее температурную зависимость удельной теплоемкости алюминиевого сплава AlTi0.1 с Li, а значения a , b , c , d приведены в таблице 5.

$$C_p^0 = a + bT + cT^2 + dT^3. \quad (3)$$

Таблица 5. Значения коэффициентов a , b , c , d , в уравнении (3) для алюминиевого сплава AlTi0.1 с литием и эталона (Al марки A5N)

Содержание лития в сплаве, мас. %	a , Дж/(кг·К)	b , Дж/(кг·К ²)	$c \cdot 10^{-3}$, Дж/(кг·К ³)	$d \cdot 10^{-7}$, Дж/(кг·К ⁴)	Коэффициент корреляции R ²
0.0	690,11	1,010	-1,27	9,08	0,999
0.01	689,64	1,012	-1,27	9,13	0,999
0.05	688,89	1,021	-1,28	9,14	0,999
0.1	688,93	1,030	-1,30	9,29	0,999
0.5	684,94	1,110	-1,42	9,85	0,999
Эталон	690,35	1,010	-1,27	9,13	1,000

Согласно уравнению (4) коэффициентов теплоотдачи для сплава AlTi0.1 с литием представленного на рисунке 5б. Видно, что добавки лития несколько уменьшают коэффициент теплоотдачи исходного сплава AlTi0.1.

$$\alpha_T = \frac{C_p^0 m \frac{dT}{d\tau}}{(T - T_0)S}, \quad (4)$$

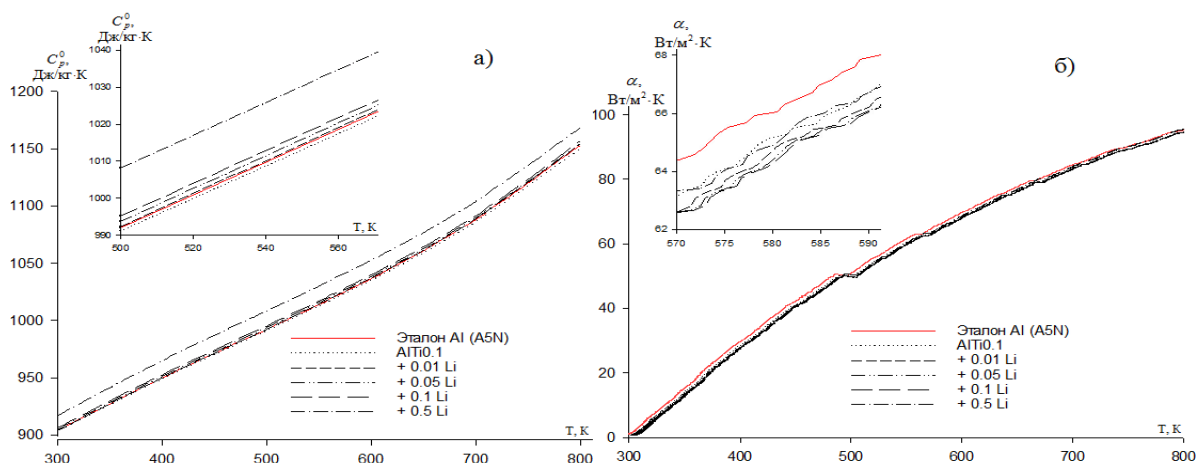


Рисунок 5. Теплоемкость (а) и коэффициент теплоотдачи (б) сплава AlTi0.1 с литием и эталона

Для нахождения данных термодинамических функций (H , S , G) (5-7) использовали уравнение (3), рассчитанные результаты представлены в таблице 5.

$$[H^0(T) - H^0(T_0)] = a(T - T_0) + \frac{b}{2}(T^2 - T_0^2) + \frac{c}{3}(T^3 - T_0^3) + \frac{d}{4}(T^4 - T_0^4), \quad (5)$$

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

$$[G^0(T) - G^0(T_0)] = [H^0(T) - H^0(T_0)] - T[S^0(T) - S^0(T_0)], \quad (7)$$

где $T_0 = 298.15$ К.

Таким образом, в режиме «охлаждения» по известной теплоёмкости эталонного образца из алюминия установлена теплоёмкость алюминиевого сплава AlTi_{0,1} с литием, натрием и калием. В результате математической обработки экспериментальных данных получены полиномы, описывающие температурную зависимость теплоёмкости и изменений термодинамических функций вышеуказанных сплавов, в интервале температур 300-800К. С помощью полученных полином показано, что при переходе от сплавов с литием к сплавам с натрием и калием теплоёмкость, коэффициент теплоотдачи, энтальпия и энтропия сплавов уменьшаются, а величина энергии Гиббса растёт. Изменение теплоёмкости алюминиевого сплава AlTi_{0,1} от содержания щелочных металлов объясняется ростом степени гетерогенности структуры сплавов при их модифицировании литием, натрием и калием. Рост изменений термодинамических функций сплавов от температуры связано с увеличением энергии колебаний кристаллической решётки сплава AlTi_{0,1} с Li, Na и K.

Таблица 6. Температурная зависимость удельной теплоёмкости, энтальпии, энтропии и энергии Гиббса для проводникового сплава AlTi_{0,1} с литием, натрием и калием и эталона (Al марки А5N)

Содержание лития, натрия и калия в сплаве, мас. %	Т, К					
	300	400	500	600	700	800
C_p , (Дж/(кг·К)) для сплавов						
0.0	903,33	949,02	991,11	1035,03	1086,25	1150,27
0.5 Li	916,73	964,77	1008,06	1052,49	1103,99	1168,46
0.5 Na	904,95	950,92	993,33	1037,64	1089,31	1153,80
0.5 K	902,59	948,62	990,93	1035,08	1086,64	1151,17
Эталон	903,70	949,58	991,97	1036,35	1088,21	1153,00
$[H^0(T) - H^0(T_0^*)]$, кДж/кг для сплавов						
0.0	1,6703	94,3406	191,3547	292,6241	398,6054	510,2997
0.5 Li	1,6950	95,8347	194,4917	297,4854	405,2264	518,7161
0.5 Na	1,6733	94,5197	191,7397	293,2501	399,5140	511,5405
0.5 K	1,6689	94,2838	191,2695	292,5316	398,5324	510,2913
Эталон	1,6709	94,3869	191,4710	292,8481	398,9913	510,9213
$[S^0(T) - S^0(T_0^*)]$, кДж/(кг·К) для сплавов						
0.0	0,00557	0,27186	0,48817	0,67268	0,83595	0,98509
0.5 Li	0,00566	0,27616	0,49612	0,68378	0,84976	1,00121
0.5 Na	0,005595	0,272381	0,489146	0,674099	0,837803	0,987298
0.5 K	0,005580	0,271700	0,487942	0,672443	0,835742	0,984880
Эталон	0,00558	0,27199	0,48846	0,67317	0,83668	0,98605
$[G^0(T) - G^0(T_0^*)]$, кДж/кг для сплавов						
0.0	-0,00517	-14,4059	-52,7317	-110,988	-186,565	-277,708
0.5 Li	-0,00525	-14,6295	-53,5725	-112,786	-189,611	-282,258
0.5 Na	-0,00518	-14,4327	-52,8331	-111,209	-186,948	-278,298
0.5 K	-0,00517	-14,3961	-52,7016	-110,934	-186,487	-277,612
Эталон	-0,00517	-14,4125	-52,7590	-111,054	-186,690	-277,922

ГЛАВА 4. КИНЕТИКА ОКИСЛЕНИЯ АЛЮМИНИЕВОГО ПРОВОДНИКОВОГО СПЛАВА AlTi_{0.1} С ЩЕЛОЧНЫМИ МЕТАЛЛАМИ, В ТВЕРДОМ СОСТОЯНИИ

С целью изучения воздействия легирующего элемента на окисляемость основного сплава эксперименты по окислению образцов из сплава AlTi_{0.1} с различным содержанием лития проводили в воздухе при определенных температурах исследования 723, 773 и 823К. Скорость окисления этих сплавов, содержащих различную концентрацию лития в этих случаях определяется скоростью роста слоя двуокиси титана или алюминия, и ряда сплавов с различными концентрациями лития. В определенных условиях скорость окисления может быть больше, чем у чистого алюминия. Кинетические кривые изображают ход протекания окислительного процесса, в результате чего наблюдается некоторый рост привеса образцов, содержащих литий (m/s), соответственно от времени (t). Ускорение процесса выявлено на 10-20 минутах от начинания окислительного процесса. Прямолинейный характер этих кривых сохраняется в этих минутах, однако дальнейший процесс изменяет ход протекания процесса. Затем наступает диффузионный процесс затрудняющий ход окислительного процесса так, что кривые приобретают другую форму и далее остаются неизменными (рисунок б).

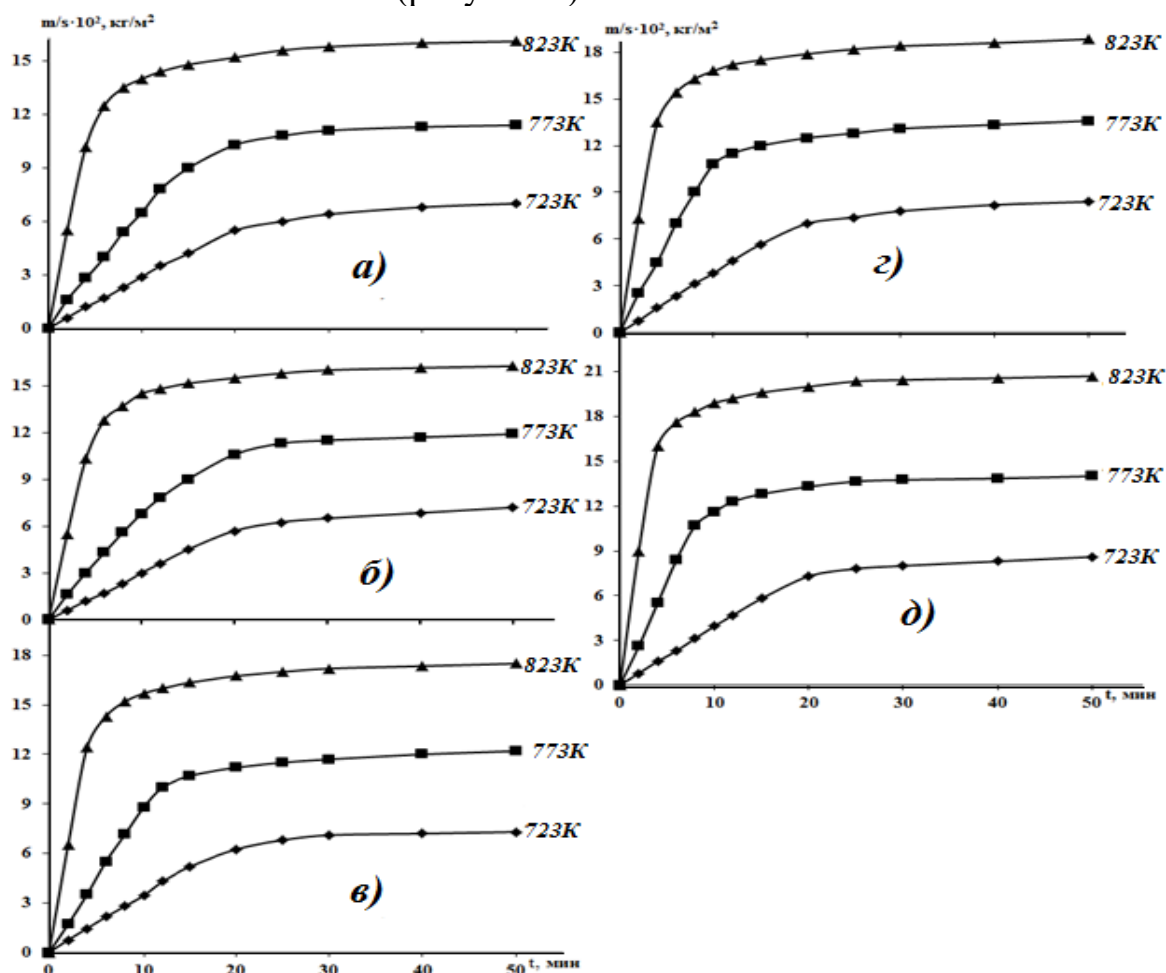


Рисунок 6. Кинетические кривые окисления алюминиевого проводникового сплава AlTi_{0.1} (а), содержащего литий, мас. %: 0,01 (б); 0,05 (в); 0,1 (г); 0,5 (д)

Результаты показывают, что во всех интервалах температуры и времени после 20 минут скорость окисления повышается пропорционально уменьшению энергии активации процесса для сплава AlTi0.1, так и для легированных сплавов с литием. Малые добавки лития имеют немного низкие скорости окисления, по сравнению с большим его добавлением (таблица 7).

Таблица 7. Кинетические характеристики процесса окисления алюминиевого проводникового сплава AlTi0.1 с литием, в твёрдом состоянии

Содержание лития в сплаве, мас. %	Температура окисления, К	Истинная скорость окисления $K \cdot 10^4$, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	$\ln K$	Наклон линии $\frac{\Delta(\ln K)}{\Delta(\frac{1}{T})}$, К	Кажущаяся энергия активации, кДж/моль
0.0	723	0,697	-9,5713	-16856,857	140,00
	773	2,700	-8,2171		
	823	11,25	-6,7890		
0.01	723	0,803	-9,4297	-16636,918	138,31
	773	3,030	-8,1016		
	823	12,50	-6,6846		
0.05	723	0,950	-9,2616	-16375,869	136,15
	773	3,657	-7,9110		
	823	14,16	-6,5596		
0.1	723	1,142	-9,0778	-15809,702	131,44
	773	4,314	-7,7485		
	823	15,50	-6,4692		
0.5	723	1,415	-8,8632	-15039,688	125,04
	773	5,000	-7,6009		
	823	16,92	-6,3816		

K-Истинная скорость окисления;

Q-Кажущаяся энергия активации окисления.

Для выявления закономерности роста оксидных пленок на поверхности образцов были графически созданы квадратичные кривые окисления для изучаемых сплавов. Кривые показывают гиперболический характер процесса, о чем свидетельствует ход непрямолинейности этих кривых от привеса образцов и времени (рисунок 7). Для других образцов сплава, также характерно подобное изменение, которое описывается общим уравнением:

$$(m/s)^2 = K \cdot t^n,$$

где $n = 1 \div 5$ представлены в таблице 8.

При содержании сплава 0,1 и 0,5% лития затрачивается больше энергии, что соответственно для протекания процесса окисления (таблица 7). Это свидетельствует о том, что в рассматриваемых случаях процесс окисления контролируют диффузионные процессы и реакции на границах фаз, и любое изменение скорости

диффузионных процессов в оксиде немедленно отразится и на общей скорости оксидообразования.

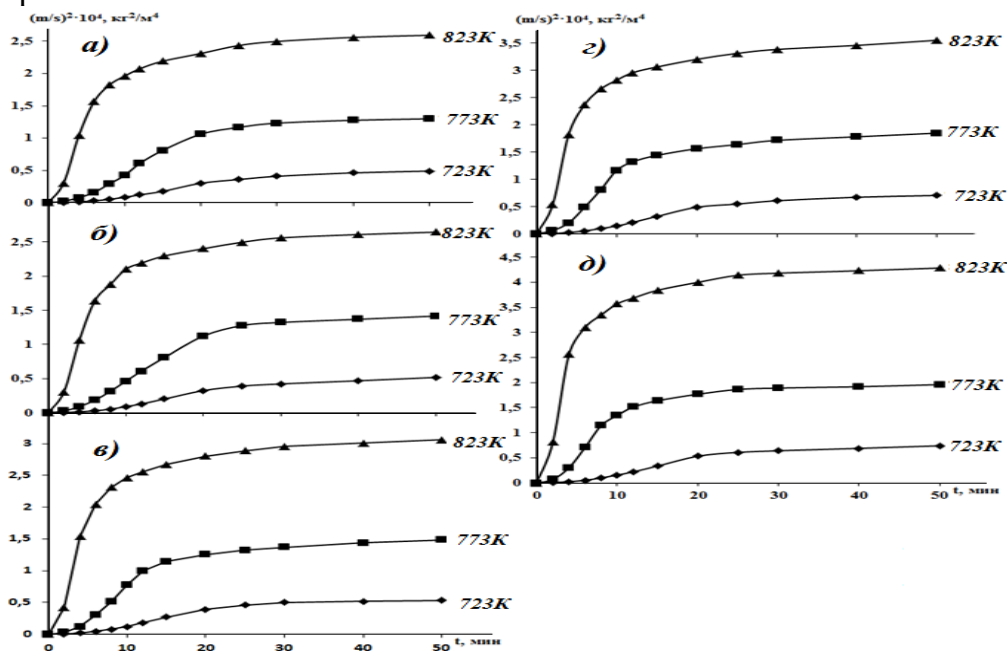


Рисунок 7. Квадратичные кинетические кривые окисления алюминиевого сплава AlTi0.1 (а), содержащего литий, мас. %: 0,01 (б); 0,05 (в); 0,1 (г); 0,5 (д)

Таблица 8. Результаты обработки квадратичных кинетических кривых процесса окисления алюминиевого проводникового сплава AlTi0,1 с литием

Содержание лития в сплаве, мас. %	Температура окисления, К	Полиномы квадратичных кинетических кривых окисления сплавов	Коэффициент корреляции R ²
0.0	723	$(m/s)^2 = -2 \cdot 10^{-9}t^6 + 2 \cdot 10^{-7}t^5 - 1 \cdot 10^{-5}t^4 + 2 \cdot 10^{-4}t^3 - 7 \cdot 10^{-4}t^2 + 3,6 \cdot 10^{-3}t^{**}$	0,999
	773	$(m/s)^2 = -2 \cdot 10^{-9}t^6 + 2 \cdot 10^{-7}t^5 - 2 \cdot 10^{-6}t^4 - 3 \cdot 10^{-4}t^3 + 8,4 \cdot 10^{-3}t^2 - 1,16 \cdot 10^{-2}t$	0,999
	823	$(m/s)^2 = 2 \cdot 10^{-8}t^6 - 2 \cdot 10^{-6}t^5 + 1 \cdot 10^{-4}t^4 - 1,9 \cdot 10^{-3}t^3 + 5,5 \cdot 10^{-3}t^2 + 0,255t$	0,990
0.01	723	$(m/s)^2 = -2 \cdot 10^{-9}t^6 + 3 \cdot 10^{-7}t^5 - 2 \cdot 10^{-5}t^4 + 3 \cdot 10^{-4}t^3 - 1,1 \cdot 10^{-3}t^2 + 4,2 \cdot 10^{-3}t$	0,999
	773	$(m/s)^2 = -3 \cdot 10^{-9}t^6 + 3 \cdot 10^{-7}t^5 + 1 \cdot 10^{-5}t^4 - 2 \cdot 10^{-5}t^3 + 5,4 \cdot 10^{-3}t^2 + 1,9 \cdot 10^{-3}t$	0,999
	823	$(m/s)^2 = 2 \cdot 10^{-8}t^6 - 3 \cdot 10^{-6}t^5 + 1 \cdot 10^{-4}t^4 - 2,6 \cdot 10^{-3}t^3 + 1,17 \cdot 10^{-2}t^2 + 0,245t$	0,990
0.05	723	$(m/s)^2 = -2 \cdot 10^{-9}t^6 + 2 \cdot 10^{-7}t^5 - 9 \cdot 10^{-6}t^4 + 1 \cdot 10^{-4}t^3 + 8 \cdot 10^{-4}t^2 + 3 \cdot 10^{-6}t$	0,999
	773	$(m/s)^2 = 9 \cdot 10^{-9}t^6 - 1 \cdot 10^{-6}t^5 + 9 \cdot 10^{-5}t^4 - 2,6 \cdot 10^{-3}t^3 + 3,22 \cdot 10^{-2}t^2 - 6,3 \cdot 10^{-2}t$	0,997
	823	$(m/s)^2 = -1 \cdot 10^{-8}t^6 - 2 \cdot 10^{-6}t^5 + 7 \cdot 10^{-5}t^4 - 1 \cdot 10^{-3}t^3 - 1,22 \cdot 10^{-2}t^2 + 0,411t$	0,985
0.1	723	$(m/s)^2 = -3 \cdot 10^{-9}t^6 + 4 \cdot 10^{-7}t^5 - 2 \cdot 10^{-5}t^4 + 3 \cdot 10^{-4}t^3 - 2 \cdot 10^{-4}t^2 + 3,2 \cdot 10^{-3}t$	0,999
	773	$(m/s)^2 = 2 \cdot 10^{-8}t^6 - 3 \cdot 10^{-6}t^5 + 2 \cdot 10^{-4}t^4 - 4,1 \cdot 10^{-3}t^3 + 4,63 \cdot 10^{-2}t^2 - 7,2 \cdot 10^{-2}t$	0,998
	823	$(m/s)^2 = 1 \cdot 10^{-8}t^6 - 2 \cdot 10^{-6}t^5 + 6 \cdot 10^{-5}t^4 - 6 \cdot 10^{-4}t^3 - 2,08 \cdot 10^{-2}t^2 + 0,502t$	0,985
0.5	723	$(m/s)^2 = -4 \cdot 10^{-9}t^6 + 5 \cdot 10^{-7}t^5 - 3 \cdot 10^{-5}t^4 + 5 \cdot 10^{-4}t^3 - 1,7 \cdot 10^{-3}t^2 + 7,2 \cdot 10^{-3}t$	0,999
	773	$(m/s)^2 = 2 \cdot 10^{-8}t^6 - 3 \cdot 10^{-6}t^5 + 2 \cdot 10^{-4}t^4 - 4,5 \cdot 10^{-3}t^3 + 4,7 \cdot 10^{-2}t^2 - 3,68 \cdot 10^{-2}t$	0,996
	823	$(m/s)^2 = 3 \cdot 10^{-9}t^6 - 2 \cdot 10^{-7}t^5 - 2 \cdot 10^{-5}t^4 + 1,9 \cdot 10^{-3}t^3 - 5,74 \cdot 10^{-2}t^2 + 0,768t$	0,985

m/s^* - привес массы образцов, кг/м²;

t^{**} - продолжительность времени окисления, мин.

Изохронны окисления, при температурах 723 и 823К показывают тенденцию к росту окисляемости сплавов с последующим снижением энергии активации (рисунок 8). Так известно, что последовательное скалывание слоев оксидов наблюдается при окислении чистого алюминия и титана и оказывает существенное влияние на кинетику процесса. С этим эффектом можно в какой-то степени связать то, что сплавы окисляются медленнее, чем чистый титан или алюминий, если при данном режиме окисления оксид на чистом титане или алюминии может последовательно откалываться, то на сплавах он прочно сцеплен с основой.

На рисунке 9 графически показаны данные $-\ln K = f(1/T)$ для сплава $AlTi_{0,1}$, содержащего литий. Наблюдается линейный характер кривых с последующими изменениями концентрации состава образцов сплава. Кривые (2-5) находящиеся сверху кривой (1) указывают об увеличении окислительного процесса. В итоге на кривых относительный привес-время возникают перегибы и максимумы, а сами кривые пересекают ось абсцисс. Расположение характерных точек кривых и величин максимумов зависят от условий эксперимента, времени выдержки и состава окисляющей среды.

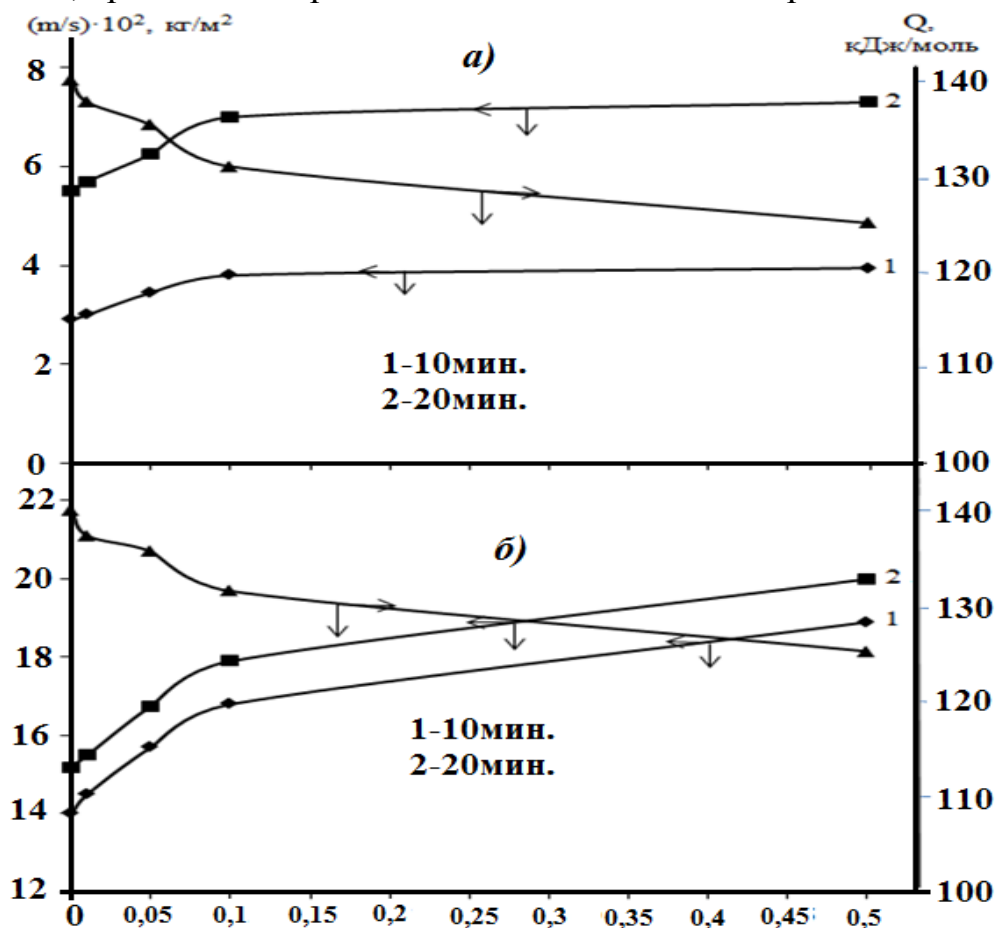


Рисунок 8. Изохронны окисления алюминиевого проводникового сплава $AlTi_{0,1}$ с литием, при 723 К(а) и 823 К(б)

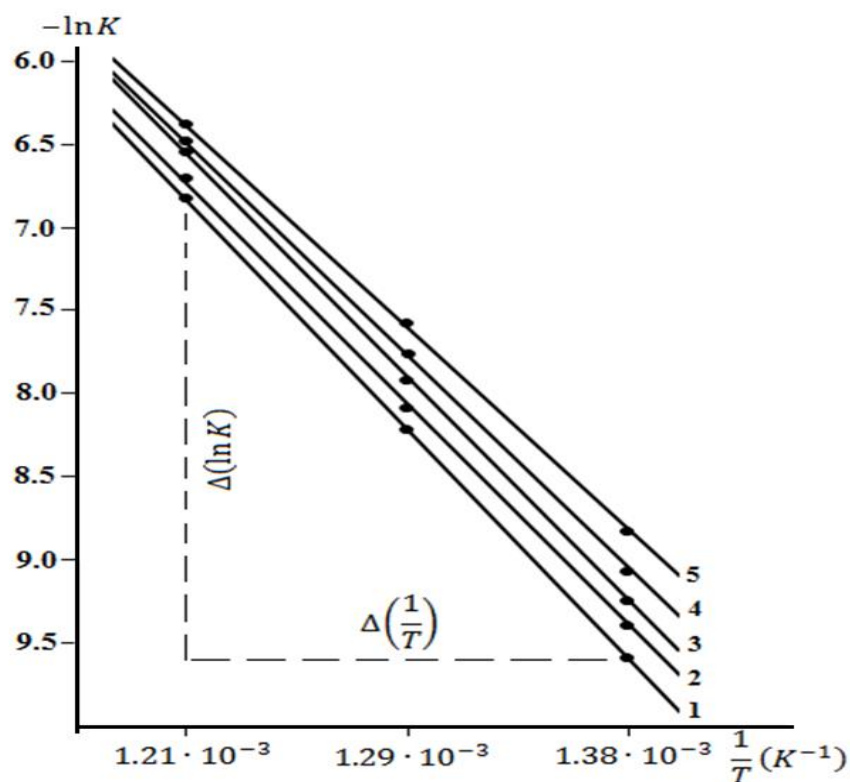


Рисунок 9. Зависимость $-\ln K$ от $1/T$ для алюминиевого проводникового сплава $AlTi_{0,1}$ (1) с литием, мас. %: 0.01(2); 0.05(3); 0.1(4); 0.5(5)

В данном исследовании щелочные элементы в пределах подгруппы уменьшают энергию активации окисления сплава $AlTi_{0.1}$. Снижение энергии активации окисления происходит переходом от сплава $AlTi_{0.1}$ к сплавам, содержащим литий, натрий и калий (рисунок 10).

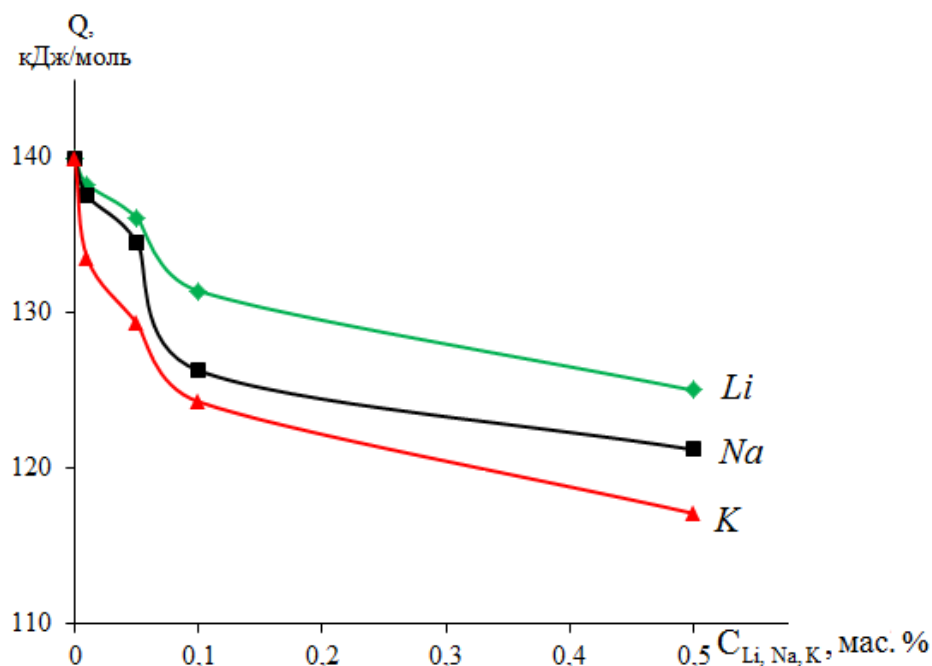


Рисунок 10. Сравнение значений энергии активации процесса окисления алюминиевого проводникового сплава $AlTi_{0.1}$ с щелочными металлами

Таким образом, условимся называть оптимальным состав с наименьшим содержанием лития, т.к. дальнейшее увеличение содержания лития дает весьма значительное повышение окисляемости. При окислении образцов сплава обнаружены оксиды: Al_2O_3 , Ti_3O_5 , TiO_2 , $\text{Li}_{2,03}\text{Ti}_{3,43}\text{O}_8$ (рисунок 11).

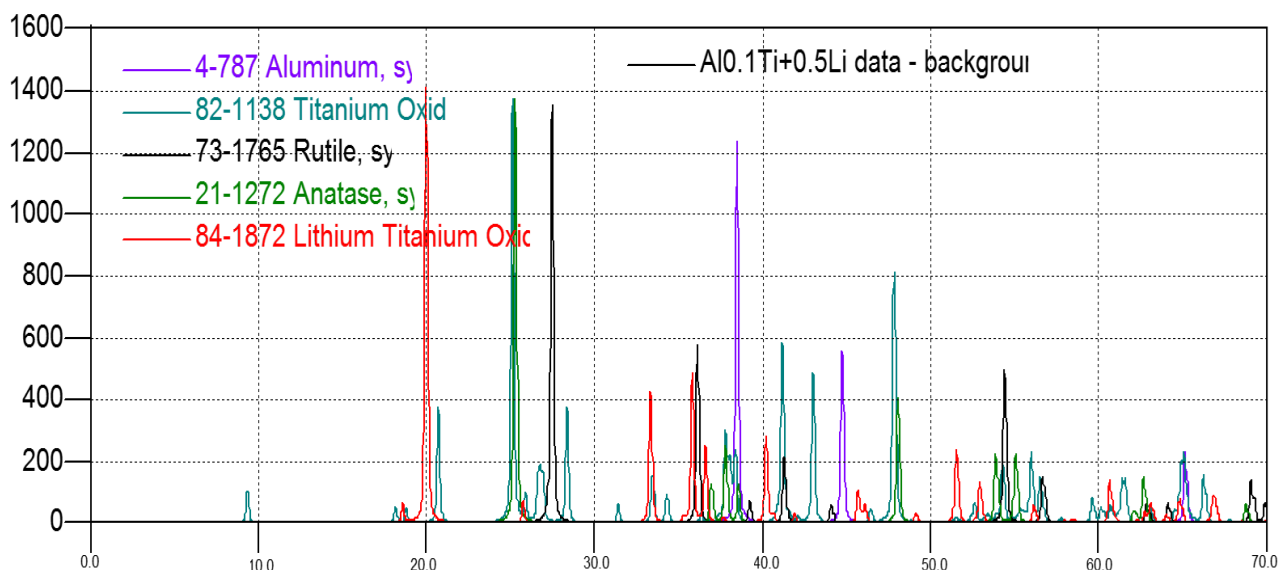


Рисунок 11. Дифрактограммы продуктов окисления алюминиевого проводникового сплава $\text{AlTi}_{0,1}$ с 0,5 мас. % литием

ГЛАВА 5. ВЛИЯНИЕ ЩЕЛОЧНЫХ МЕТАЛЛОВ НА КОРРОЗИОННО-ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ АЛЮМИНЕВОГО ПРОВОДНИКОВОГО СПЛАВА $\text{AlTi}_{0,1}$, В СРЕДЕ ВОДНОГО РАСТВОРА NaCl

В таблице 9 обобщены коррозионно-электрохимические характеристики исследуемого сплава $\text{AlTi}_{0,1}$ в среде электролита NaCl различной концентрации. Результаты коррозионно-электрохимических исследований алюминиевого сплава $\text{AlTi}_{0,1}$ с добавкой лития в среде электролита NaCl показывают, что введение 0,01–0,5 % Li способствует смещению потенциала свободной коррозии ($E_{\text{св.кор}}$) в положительную область значений. При этом чем больше количество модифицирующего компонента (лития), тем положительнее величина $E_{\text{св.кор}}$. Последняя при переходе от 0,03 %-ного NaCl к 3,0 %-ному становится более отрицательной независимо от количества модифицирующей добавки (Li) в сплаве $\text{AlTi}_{0,1}$.

Как видно, с ростом содержания лития в исходном образце $\text{AlTi}_{0,1}$ потенциалы коррозии, питтингообразования и репассивации смещаются в положительную область значений, вследствие формирования устойчивой оксидной пленки на поверхности электрода в среде NaCl . Скорость коррозии сплавов, содержащих 0,01–0,5% Li , на 10–20% меньше, чем у исходного образца $\text{AlTi}_{0,1}$ (таблица 9).

Таблица 9. Коррозионно-электрохимические характеристики (х.с.э) алюминиевого проводникового сплава AlTi0.1, модифицированного литием, в среде электролита NaCl

NaCl, мас. %	Li, мас. %	Электрохимические потенциалы, В (х.с.э)				Параметры коррозии	
		$-E_{св.кор}$	$-E_{кор}$	$-E_{п.о}$	$-E_{р.п}$	$i_{кор},$ А/м ²	$K \cdot 10^3,$ г/(м ² ·ч)
0,03	0,0	0,685	1,120	0,610	0,660	0,048	16,0
	0,01	0,663	1,100	0,591	0,640	0,045	15,0
	0,05	0,650	1,090	0,582	0,630	0,043	14,4
	0,1	0,640	1,080	0,570	0,620	0,041	13,7
	0,5	0,630	1,071	0,560	0,610	0,039	13,0
0,30	0,0	0,740	1,150	0,650	0,690	0,068	22,7
	0,01	0,718	1,132	0,630	0,669	0,065	21,7
	0,05	0,710	1,125	0,619	0,660	0,062	21,1
	0,1	0,698	1,112	0,610	0,650	0,061	20,4
	0,5	0,690	1,100	0,600	0,641	0,059	19,7
3,00	0,0	0,809	1,180	0,700	0,750	0,086	28,8
	0,01	0,790	1,165	0,682	0,733	0,083	27,8
	0,05	0,776	1,154	0,670	0,725	0,081	27,1
	0,1	0,765	1,143	0,661	0,716	0,079	26,4
	0,5	0,752	1,130	0,650	0,705	0,077	25,7

Зависимость скорости коррозии сплава AlTi0.1 от содержания в нем лития и концентрации электролита NaCl представлены на рисунке 12. Выявлено, что добавки лития в сплав AlTi0.1 уменьшают скорость его коррозии во всех исследованных средах электролита NaCl.

На рисунке 13 представлена зависимость плотности тока коррозии алюминиевого проводникового сплава AlTi0.1 от количества добавки лития при различных концентрациях электролита NaCl. Видно, что по мере увеличения содержания модификатора этот показатель коррозии снижается. Концентрацию лития в сплаве AlTi0.1 в пределах 0,05–0,5 мас. % можно считать оптимальной, так как в этом случае сплавы характеризуются минимальной скоростью коррозии. С увеличением содержания хлорид-иона наблюдается повышение скорости коррозии как исходного алюминиевого сплава, так и модифицированного литием.

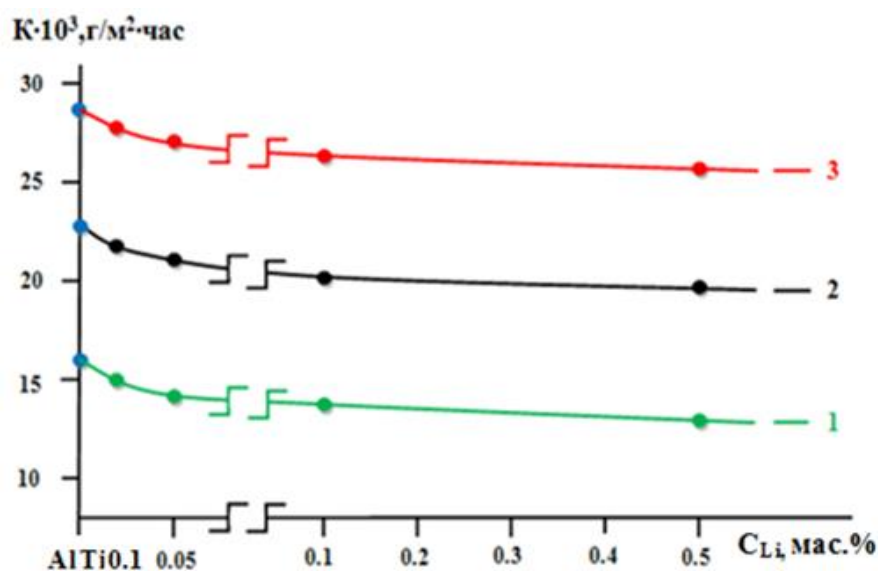


Рисунок 12. Зависимость скорости коррозии сплава AlTi0.1 от содержания лития при разных содержаниях NaCl в электролите, мас. %: 0,03 (1), 0,3 (2) и 3,0 (3)

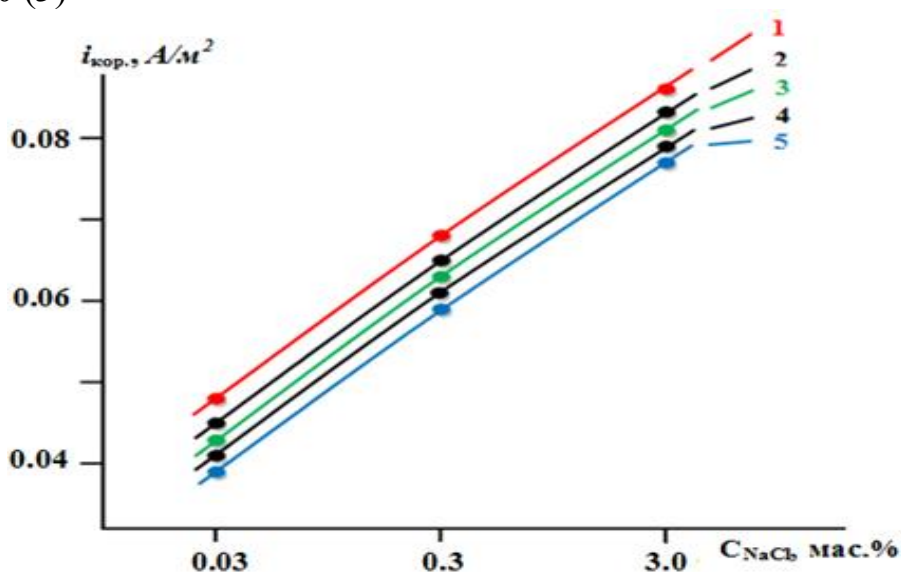


Рисунок 13. Зависимость плотности тока коррозии сплава AlTi0.1 (1) и модифицированных образцов с Li (2–5) от концентрации электролита NaCl. Содержание лития, мас. %: 0,0(1), 0,01(2), 0,05(3), 0,10(4) и 0,5(5)

Положительное действие щелочных металлов на анодные свойства алюминиевого сплава AlTi0,1 не может объясняться только увеличением истинной поверхности анода, уплотнением защитного оксидного слоя или улучшением электрохимических показателей анодного процесса. Стойкость сплава AlTi0,1 зависит также от изменения размеров кристаллов алюминиевого твердого раствора и изменения микроструктуры, т.е. от размера зерен сплавов в результате модифицирования его титаном и щелочными металлами. Модификаторами структуры сплава могут служить щелочные металлы,

имеющие малую межатомную связь и, следовательно, низкую температуру плавления, малую прочность и твердость.

Анодные ветви потенциодинамических кривых сплава AlTi_{0,1} с щелочными металлами в среде 3,0 %-го NaCl (рисунок 14) показывают, что кривые, относящиеся к модифицированным сплавам, располагаются левее кривой исходного сплава AlTi_{0,1}, т.е. скорость анодной коррозии сплавов с щелочными металлами несколько меньше, чем у сплава AlTi_{0,1}.

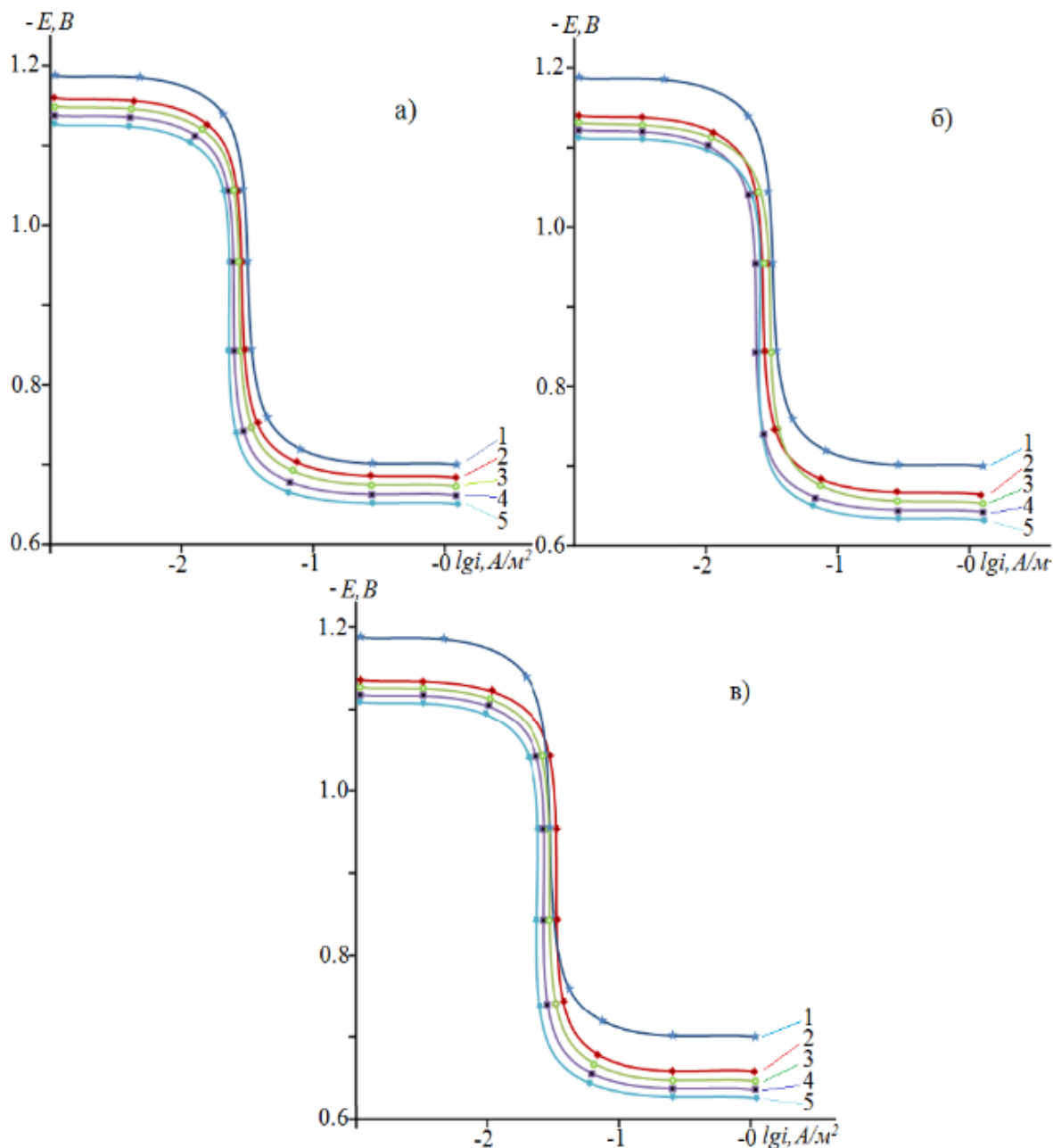


Рисунок 14. Анодные ветви потенциодинамических кривых (скорость развертки потенциала 2 мВ/с) алюминиевого проводникового сплава AlTi_{0,1} (1), содержащего литий (а), натрий (б) и калий (в), %(мас.): 0,01 (2); 0,05 (3); 0,1 (4); 0,5 (5), в среде электролита 3,0%-го NaCl литием, натрием и калием
Содержание Li, Na, K, мас. %: 0 (1), 0,01 (2), 0,05 (3), 0,1 (4) и 0,5 (5)

Обобщенные результаты сравнительного исследования анодных свойств алюминиевого сплава AlTi0,1 с щелочными металлами приведены в таблицах 10, 11. С увеличением концентрации хлорид-иона потенциал свободной коррозии алюминиевого сплава AlTi0,1 смещается в отрицательном направлении от -0,685 В в среде 0,03 %-го NaCl до -0,809 В в среде 3,0 %-го NaCl (таблица 10).

Плотность тока коррозии и соответственно, скорость коррозии алюминиевого сплава AlTi0,1 с щелочными металлами с ростом концентрации хлорид-иона увеличиваются. При переходе от сплава AlTi0,1 с литием к сплавам с натрием и калием наблюдается уменьшение скорости коррозии. Для алюминиевого сплава AlTi0,1, также характерен рост скорости коррозии с увеличением концентрации хлорид-иона в электролите (таблица 10).

Таким образом, установлено положительное влияние добавок лития, натрия и калия на анодные характеристики и скорости коррозии алюминиевого проводникового сплава AlTi0,1, в среде электролита NaCl. Выявленные закономерности могут служить научной основой при разработке состава новых проводниковых алюминиевых сплавов для нужд электротехнической отрасли.

Таблица 10. Потенциалы свободной коррозии ($E_{св.кор.}$, В) и питтингообразования ($E_{п.о.}$, В) сплава AlTi0,1 с литием, натрием и калием, в среде электролита NaCl

Среда NaCl	Содержание ЦМ	Сплавы с Li		Сплавы с Na		Сплавы с K	
		- $E_{св.кор.}$	- $E_{п.о.}$	- $E_{св.кор.}$	- $E_{п.о.}$	- $E_{св.кор.}$	- $E_{п.о.}$
	мас. %	В(х.с.э.)					
0,03	Al марки А6	0,701	0,623	0,701	0,623	0,701	0,623
	AlTi0,1	0,685	0,610	0,685	0,610	0,685	0,610
	0,01	0,663	0,591	0,648	0,570	0,638	0,555
	0,05	0,650	0,582	0,636	0,560	0,626	0,544
	0,1	0,640	0,570	0,624	0,551	0,612	0,534
	0,5	0,630	0,560	0,613	0,541	0,600	0,525
0,3	Al марки А6	0,756	0,661	0,756	0,661	0,756	0,661
	AlTi0,1	0,740	0,650	0,740	0,650	0,740	0,650
	0,01	0,718	0,630	0,700	0,610	0,686	0,600
	0,05	0,710	0,619	0,690	0,600	0,672	0,590
	0,1	0,698	0,610	0,680	0,591	0,659	0,580
	0,5	0,690	0,600	0,671	0,582	0,645	0,571
3,0	Al марки А6	0,909	0,713	0,909	0,713	0,909	0,713
	AlTi0,1	0,809	0,700	0,809	0,700	0,809	0,700
	0,01	0,790	0,682	0,770	0,668	0,757	0,660
	0,05	0,776	0,670	0,760	0,660	0,744	0,650
	0,1	0,765	0,661	0,750	0,651	0,731	0,640
	0,5	0,752	0,650	0,739	0,642	0,717	0,631

Таблица 11. Зависимость скорости коррозии алюминиевого проводникового сплава AlTi0,1 с литием, натрием и калием, в среде электролита NaCl

Среда NaCl, мас. %	Содержание ЦМ, мас. %	Сплавы с Li		Сплавы с Na		Сплавы с K	
		$i_{кор.} \cdot 10^2$, А/м ²	$K \cdot 10^3$, г/(м ² ·ч)	$i_{кор.} \cdot 10^2$, А/м ²	$K \cdot 10^3$, г/(м ² ·ч)	$i_{кор.} \cdot 10^2$, А/м ²	$K \cdot 10^3$, г/(м ² ·ч)
0,03	Al марки А6	0,060	20,1	0,060	20,1	0,060	20,1
	AlTi0,1	0,048	16,0	0,048	16,0	0,048	16,0
	0,01	0,045	15,0	0,041	13,7	0,038	12,7
	0,05	0,043	14,4	0,039	13,0	0,036	12,0
	0,1	0,041	13,7	0,037	12,3	0,034	11,3
	0,5	0,039	13,0	0,035	11,7	0,032	10,7
0,3	Al марки А6	0,080	26,8	0,080	26,8	0,080	26,8
	AlTi0,1	0,068	22,7	0,068	22,7	0,068	22,7
	0,01	0,065	21,7	0,061	20,4	0,058	19,4
	0,05	0,062	21,1	0,059	19,7	0,056	18,7
	0,1	0,061	20,4	0,057	19,0	0,054	18,0
	0,5	0,059	19,7	0,055	18,4	0,052	17,4
3,0	Al марки А6	0,098	32,83	0,098	32,83	0,098	32,83
	AlTi0,1	0,086	28,8	0,086	28,8	0,086	28,8
	0,01	0,083	27,8	0,079	26,4	0,076	25,4
	0,05	0,081	27,1	0,077	25,7	0,074	24,7
	0,1	0,079	26,4	0,075	25,1	0,072	24,1
	0,5	0,077	25,7	0,073	24,4	0,070	23,4

ВЫВОДЫ

1. Проведенный анализы литературных источников дали обоснованные научные основы для выполнения синтеза сплава AlTi0.1 с литием, натрием и калием и изучения их физико-механических и физико-химических свойств.

2. Установлено, что с ростом лития, натрия и калия в сплаве AlTi0.1 повышается твердость и прочность сплавов. Щелочные металлы положительно воздействуют на микроструктуру сплава AlTi0.1 и приводят к тому, что размеры зерен становятся значительно меньше, что становится причиной изменений в характеристиках сплавов.

3. В режиме «охлаждения» по известной теплоемкости эталонного образца из алюминия марки А5N установлена теплоемкость алюминиевого проводникового сплава AlTi0,1 с литием, натрием и калием. Изменение теплоемкости сплава AlTi0,1 от содержания щелочных металлов объясняется ростом степени гетерогенности структуры сплавов при их модифицировании.

4. Получены полиномы, описывающие температурную зависимость теплоемкости и изменений термодинамических функций в интервале температур 300-800К. Рост изменений термодинамических функций сплавов связан с ростом энергии колебаний кристаллической решетки сплава AlTi0,1 с литием, натрием и калием.

5. Выявлено, что повышение скорости окисления приводит к уменьшению энергии активации процесса окисления при переходе от сплава

AlTi0.1 с литием к сплавам с натрием и калием. Показано, что при окислении сплавов образуются следующие оксиды Al_2O_3 , Ti_3O_5 , TiO_2 , $Li_{2.03}Ti_{3.43}O_8$, $Na_2Al_{22}O_{34}$, $Al_{21.86}K_{2.59}O_{34}$.

6. Установлено, что концентрации лития, натрия и калия в сплаве AlTi0.1 в пределах 0,05-0,5 мас. % являются оптимальными, так как в этом случае сплавы характеризуются минимальной скоростью коррозии. С увеличением содержания хлорид-иона наблюдается повышение скорости коррозии как исходного сплава, так и сплавов, модифицированных литием, натрием и калием.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ

*Статьи, опубликованные в рецензируемых журналах, рекомендуемых
ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации:*

1. Ганиев, И.Н. Влияние щелочных металлов на анодное поведение алюминиевого проводникового сплава AlTi0.1 в среде электролита NaCl / И.Н. Ганиев, **Г.М. Рахматуллоева**, Ф.Ш. Зокиров, Б.Б. Эшов // *Материаловедение*. – 2025. - №9. – С. 3-8 (**Scopus – Q3**).

2. Ганиев, И.Н. Влияние лития на анодное поведение алюминиевого сплава AlTi0,1% в среде электролита NaCl / И.Н. Ганиев, **Г.М. Рахматуллоева**, Ф.Ш. Зокиров, Б.Б. Эшов // *Известия ВУЗов. Цветная металлургия*. – 2023. – Т. 29. - №6. – С. 13-21 (**Scopus – Q3**).

3. Ганиев, И.Н. Влияние добавок натрия на анодное поведение алюминиевого проводникового сплава AlTi0.1, в среде электролита NaCl / И.Н. Ганиев, **Г.М. Рахматуллоева**, Ф.Ш. Зокиров, Б.Б. Эшов // *Физикохимия поверхности и защита материалов*. – 2023. – Т.59. - № 4. – С. 451–455 (**Scopus – Q3**).

Ganiev, I.N. The effect of sodium additives on the anodic behavior of AlTi0.1 aluminum conductor alloy in a medium of NaCl electrolyte / I.N. Ganiev, **G.M. Rakhmatulloeva**, F.Sh. Zokirov, B.B. Eshov // *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. – 2023. – Vol. 59. – No.4. – P. 639–643 (**Scopus – Q3**).

4. Ганиев, И.Н. Влияние лития, натрия и калия на температурную зависимость теплофизических свойств и изменений термодинамических функций алюминиевого проводникового сплава AlTi0.1 / И.Н. Ганиев, Ф.Ш. Зокиров, **Г.М. Рахматуллоева**, Х.М. Ходжаназаров // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, Материаловедение. Машиностроение, материаловедение*. – 2025. - Т.27. - №2. – С. 30-41.

5. Ганиев, И.Н. Влияние лития на температурную зависимость теплофизических свойств и изменений термодинамических функций алюминиевого сплава AlTi0.1 / И.Н. Ганиев, Ф.Ш. Зокиров, **Г.М. Рахматуллоева**, С.У. Худойбердизода, Муллоева Н.М., Саидзода М.М. // *Вестник Саратовского государственного технического университета*. – 2025. - №2 (105). – С. 55-68.

6. Ганиев, И.Н. Температурная зависимость теплоемкости и изменений термодинамических функций алюминиевого проводникового сплава $AlTi_{0,1}$ с натрием / И.Н. Ганиев, **Г.М. Рахматуллоева**, Ф.Ш. Зокиров, Б.Б. Эшов, Н.А. Аминова, С.У. Худойбердизода // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2024. - № 1 (161). – С. 34-42.

7. Зокиров Ф.Ш. Кинетика окисления алюминиевого проводникового сплава $AlTi_{0,1}$ с литием в твёрдом состоянии / Ф.Ш. Зокиров, И.Н. Ганиев, **Г.М. Рахматуллоева**, М.М. Махмадизода // Известия вузов. Технология легкой промышленности 2025. Т73. № 3. – С. 35-42.

8. Зокиров Ф.Ш. Кинетика окисления алюминиевого проводникового сплава $AlTi_{0,1}$ с калием в твердом состоянии / Ф.Ш. Зокиров, И.Н. Ганиев, **Г.М. Рахматуллоева**, М.М. Махмадизода // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2025, – № 3 (71). – С. 35-45.

9. Ганиев, И.Н. Температурная зависимость теплоемкости и термодинамических функций алюминиевого проводникового сплава $AlTi_{0,1}$ с калием / И.Н. Ганиев, Ф.Ш. Зокиров, **Г.М. Рахматуллоева**, Р.Д. Исмонов // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2024. - № 4 (68). – С. 117-124.

Изобретения:

10. Малый патент Республики Таджикистан № ТЈ 1443. Алюминиевый электротехнический сплав / И.Н. Ганиев, **Г.М. Рахматуллоева**, Ф.Ш. Зокиров, Б.Б. Эшов, Н.И. Ганиева, Б.Б. Джабборов / № 2301780; заявл. 13.01.23, опубл. 24.11.23г. (Акт опытно-промышленного испытания «Алюминиевый проводниковый сплав» от 16.03.2025г.).

Статьи, опубликованные в материалах конференций:

11. Ганиев, И.Н. Температурная зависимость изменений термодинамических функций алюминиевого проводникового сплава $AlTi_{0,1}$ с литием / И.Н. Ганиев, Ф.Ш. Зокиров, **Г.М. Рахматуллоева**, Н.И. Ганиева // Материалы международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы развития текстильной промышленности Республики Таджикистан в период ускоренной индустриализации». Таджикский технический университет им. акад. М.С. Осими, Душанбе. – 2024. – С. 300-303.

12. Ганиев, И.Н. Температурная зависимость коэффициента теплоотдачи алюминиевого проводникового сплава $AlTi_{0,1}$ с литием / И.Н. Ганиев, Ф.Ш. Зокиров, **Г.М. Рахматуллоева**, М.М. Махмадизода // Материалы международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы развития текстильной промышленности Республики Таджикистан в период ускоренной индустриализации». Таджикский технический университет им. акад. М.С. Осими, Душанбе. – 2024. – С. 295-300.

13. Ганиев, И.Н. Температурная зависимость теплоёмкости и изменений термодинамических функций алюминиевого проводникового сплава $AlTi_{0,1}$ с натрием / И.Н. Ганиев, **Г.М. Рахматуллоева**, Б.Б. Эшов, Ф.Ш. Зокиров, Н.А. Аминова, С.У. Худойбердизода // Материалы республиканской научно-практической конференции «Современные проблемы физики

конденсированного состояния». Худжандский государственный университет им. Б. Гафуров, Худжанд. – 2024. – С. 138-143.

14. **Рахматуллоева, Г.М.** Анодное поведение алюминированного проводникового сплава AlTi_{0,1}%, модифицированного литием, в среде электролита 0,3%-ного NaCl / Г.М. Рахматуллоева, И.Н. Ганиев, Б.Б. Эшов, Ф.Ш. Зокиров // Сборник материалов II Международной научной конференции «Инновационное развитие науки». Центр по исследованию инновационных технологий Национальной академии наук Таджикистана, Душанбе. –2022. –С. 49-52.

15. **Рахматуллоева, Г.М.** Потенциал свободной коррозии алюминированного проводникового сплава AlTi_{0,1} с натрием, в среде электролита 3,0%-ного NaCl / Г.М. Рахматуллоева, И.Н. Ганиев, Ф.Ш. Зокиров, Б.Б. Эшов // Сборник материалов Республиканской научно-практической конференции, посвященной двадцатилетию изучения и развития естественных, точных и математических наук, РТСУ, Душанбе. – 2022. – С. 127-129.

16. **Рахматуллоева, Г.М.** Влияние лития на потенциал свободной коррозии алюминированного проводникового сплава AlTi_{0,1}, в среде электролита 3,0%-ного NaCl / Г.М. Рахматуллоева, И.Н. Ганиев, Ф.Ш. Зокиров, Б.Б. Эшов // Сборник материалов II Международной научной конференции «Инновационное развитие науки». Центр по исследованию инновационных технологий Национальной академии наук Таджикистана, Душанбе. – 2021. –С. 76-79.

17. **Рахматуллоева, Г.М.** Потенциодинамическое исследование алюминированного проводникового сплава AlTi_{0,1} с натрием, в среде электролита 0,3 –ного NaCl / Г.М. Рахматуллоева, И.Н. Ганиев, Ф.Ш. Зокиров, Б.Б. Эшов // Материалы международной научной конференции на тему «Развитие энергетической отрасли в Республике Таджикистан», Технический колледж таджикского технического университета имени академика М.С. ОСИМИ Душанбе. – 2023. –С. 90-93.

18. **Рахматуллоева, Г.М.** Потенциодинамические исследование алюминированного проводникового сплава AlTi_{0,1} с натрием, в среде электролита 0,03 –ного NaCl / Г.М. Рахматуллоева, И.Н. Ганиев, Ф.Ш. Зокиров, Б.Б. Эшов // Материалы международной научно – практической конференции «Развитие математических, точных и естественных наук в современных условиях: проблемы и перспективы», Дангара. – 2023. –С. 387-390.

19. **Рахматуллоева, Г.М.** Потенциодинамические исследование алюминированного проводникового сплава AlTi_{0,1} с литием, в среде 3.0%-ного электролита NaCl / Г.М. Рахматуллоева, И.Н. Ганиев, Ф.Ш. Зокиров, Б.Б. Эшов, У.Ш. Якубов // Сборник материалов III Международной научной конференции «Инновационное развитие науки». Центр по исследованию инновационных технологий Национальной академии наук Таджикистана, Душанбе. – 2024.–С. 29-32.

20. **Рахматуллоева, Г.М.** Исследование алюминированного проводникового сплава AlTi_{0,1} с натрием методом охлаждения / Г.М. Рахматуллоева, И.Н. Ганиев, С.У. Худойбердизода, Н.М. Муллоева, М. Махмудзода, Ф.Ш. Зокиров // Межд. научно-практ. конференции Посвящено дню таджикской науки под названием «Технологии и инновации в реализации стратегии развития науки и техники» и «Реализация стратегии развития точных и математических наук на 2020-2040 годы и государственной целевой программы развития математических, точных и естественных наук на 2021-2025 годы», Худжанд. – 2025. -С. 204-212.

Сдано в печать 06.05.2026 г.
Подписано в печать 10.05.2026 г.
Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная.
Печать офсетная. Тираж 100экз.
Отпечатано в типографии
ООО «Сармад-Компания»
г. Душанбе, ул. Лахути 6, 1 проезд