

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

На правах рукописи



САВДУЛЛОЕВА Салима Савдуллоевна

**ВЛИЯНИЕ ЛАНТАНА, ЦЕРИЯ И ПРАЗЕОДИМА НА
ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА $\text{AlMg5.5Li2.1Zr0.15}$
ТИПА ДЮРАЛЮМИН**

**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 Национальной академии наук Таджикистана».

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

Официальные оппоненты: **Махмадизода Муродали Махмади** – доктор технических наук, доцент, начальник учебно-методического отдела Душанбинского филиала НИТУ МИСИС

Алихонова Сурайё Джамshedовна - кандидат химических наук, доцент кафедры «Химия и биология» Российско-Таджикского (Славянского) университета

Ведущая организация: Государственное учреждение «Научно-исследовательский Институт металлургии» открытого акционерного общества «Таджикская алюминиевая компания» (ТАЛКО).

Защита состоится «24» августа 2026 года в 9⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета 73.1.002.02 при ГНУ «Институт 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. В последние десятилетия в промышленности наблюдается устойчивая тенденция к расширению применения алюминия и его сплавов. Это связано прежде всего с особыми свойствами, которые проявляют алюминий и его сплавы. С каждым годом наблюдается рост производства сплавов алюминия. Одновременно с этим наблюдается постепенная замена традиционных конструкционных материалов (чугун и сталь) на алюминиевые.

Активное расширение сфер применения алюминиевых сплавов и то что они стали незаменимыми в транспорте, строительстве, в легкой и тяжелой промышленности и других отраслях техники требуют разработки новых высокоэффективных технологий и материалов, обеспечивающих увеличение их прочности, термостабильности, надежности и долговечности.

К сегодняшним конструкционным материалам предъявляют высокие требования по надёжности и долговечности, механическим, физическим, и эксплуатационным свойствам, уровень и стабильность которых в значительной степени определяются содержанием в сплавах тех или иных легирующих компонентов и примесей.

Сплавы алюминия считаются перспективными материалами благодаря ряду свойств, таких как легкость в сочетании с высокой прочностью, высоким модулем упругости и пластичностью. Они способны выдерживать большое количество нагрузок и надрезы. Благодаря этому они являются незаменимым материалом в самолетостроении и в целом в авиации. Преимущества дюралюминиевых сплавов, которых чаще всего применяют для изготовления деталей, шасси автомобилей, строительной техники и создания различных конструкций, в том, что они выдерживают высокую механическую нагрузку при этом легкие и прочные.

Представленное в этой работе исследование посвящено изучению влияния малых добавок редкоземельных металлов (лантан, церий, празеодим) на комплекс свойств алюминиевого сплава $AlMg5.5Li2.1Zr0.15$. Исходный сплав был легирован металлами лантан, церий и празеодим в малых количествах и были исследованы изменения в механических свойствах, в коррозионной стойкости при высоких температурах и в среде жидкого раствора хлорида натрия.

Поиск сведений по влиянию редкоземельных элементов цериевой подгруппы на свойства сплава $AlMg5.5Li2.1Zr0.15$ показал отсутствие исследований, проведенных в данном направлении. И нами была поставлена цель синтезировать новые сплавы с добавлением РЗМ и исследовать комплекс свойств, которые могут быть полезны как новые знания об этой группе сплавов, так и для практического применения в промышленности.

Степень разработанности темы. Тема исследования свойств алюминиевых сплавов типа дюралюмин является одной из наиболее разработанных в области материаловедения и металлургии цветных металлов. тема обладает высокой степенью научной разработанности, однако сохраняет

актуальность благодаря постоянному совершенствованию материалов и технологий их производства. Значительный вклад в развитие теории и практики дюралюминов внесли А.Н.Туполев, И.И. Сидорин, С.М.Воронов, Ю.Г. Музалевский, В.А.Буталов, А.А.Бочвар, Д.А. Петров, И.Н. Фридляндер, Ф.И.Квасов и др.

Цель работы: синтез новых коррозионностойких сплавов на основе алюминиевого сплава $\text{AlMg}_{5.5}\text{Li}_{2.1}\text{Zr}_{0.15}$ типа дюралюмин путем легирования редкоземельными металлами La, Ce и Pr и исследование их влияния на структуру и свойства материала.

Задачи исследования:

1. Исследовать изменения микроструктуры и механических свойств сплавов в результате легирования металлами лантан, церий, празеодим;
2. Определить изменения теплофизических и термодинамических функций сплава $\text{AlMg}_{5.5}\text{Li}_{2.1}\text{Zr}_{0.15}$ в результате легирования металлами лантан, церий, празеодим;
3. Определить механизм и кинетику высокотемпературного твердофазного окисления сплава $\text{AlMg}_{5.5}\text{Li}_{2.1}\text{Zr}_{0.15}$ легированного La, Ce и Pr;
4. Определить фазовый состав образовавшихся оксидов и их роль в процессе высокотемпературного окисления;
5. Исследовать электрохимическое поведение новых сплавов в среде жидкого раствора NaCl, выявить изменения скорости коррозии от концентрации добавок (La, Ce и Pr);
6. Выявить состав, имеющий наиболее оптимальные свойства для использования в промышленности.

Научная новизна исследований:

- методом металлографии показано, что легирование лантаном, церием и празеодимом, до 1.0 мас. % приводит к измельчению структурных составляющих алюминиевого сплава $\text{AlMg}_{5.5}\text{Li}_{2.1}\text{Zr}_{0.15}$ типа дюралюмин;
- измерение твёрдости образцов методом Бринелля показал уменьшение твёрдости и прочности сплава $\text{AlMg}_{5.5}\text{Li}_{2.1}\text{Zr}_{0.15}$ при добавке редкоземельных металлов (La, Ce, Pr) до 1.0 мас. %;
- установлены влияния легирующих элементов (La, Ce, Pr), а также температуры на теплоёмкость и термодинамические функции сплава $\text{AlMg}_{5.5}\text{Li}_{2.1}\text{Zr}_{0.15}$. Выявлено что увеличение доли легирующих элементов La, Ce и Pr приводит к росту энтальпии, энтропии и теплоёмкости, но снижает величину энергии Гиббса;
- методом термогравиметрии выявлено, увеличение скорости окисления образцов с ростом температуры и объема легирующих элементов (La, Ce, Pr);
- рентгенофазовый анализ показал образование следующих оксидов при твердофазном окислении сплавов: Al_2O_3 ; MgAl_2O_4 ; Li_2O ; $(\text{Mg}_{0.4}\text{Al}_{0.6})\text{Al}_{1.8}\text{O}_4$; $(\text{Mg}_{0.4}\text{Al}_{0.6})\text{Al}_{1.8}\text{O}_4$; ZrO_2 ; MgAl_2O_4 ; $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ (a) $(\text{Mg}_{0.75}\text{Al}_{0.25}) (\text{Al}_{0.875}\text{Mg}_{0.125})_2\text{O}_4$; $\text{Zr}_{0.952}\text{O}_2$; $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$; $(\text{Mg}_{0.64}\text{Al}_{0.36}) (\text{Al}_{0.82}\text{Mg}_{0.18})_2\text{O}_4$; Al_2MgO_4 ; $\text{La}_{1.52}\text{Al}_{1.68}\text{O}_{4.04}$; Zr_3O ; $(\text{Mg}_{0.68}\text{Al}_{0.32}) (\text{Al}_{0.84}\text{Mg}_{0.16})_2\text{O}_4$; MgAl_2O_4 ; LiAl_5O_8 ; $(\text{Mg}_{0.4}$

$\text{Al}_{0.6}\text{Al}_{1.8}\text{O}_4$; CeO_2 ; $\text{ZrO}_{1.97}$; MgAl_2O_4 ; $\text{Zr}_{0.875}\text{Mg}_{0.125}\text{O}_{1.875}$; $\text{Zr}_{0.932}\text{O}_2$; $\text{Pr}_{0.53}\text{Al}_{11}\text{O}_{16.96}$; Zr_2O_3 ; MgO ; $\text{Pr}_{0.55}\text{Al}_{10.92}\text{O}_{16.86}$; $\text{Pr}_{12}\text{O}_{22}$.

- установлена роль легирующих элементов в формировании фазового состава продуктов окисления и механизме процесса окисления;
- потенциостатическим методом выявлено, что добавки редкоземельных металлов (La, Ce, Pr) в исследованном концентрационном интервале (0.01-1.0 мас. %) увеличивают стойкость исходного сплава к коррозии на 20-28%.

Практическая значимость работы. Полученные в работе результаты имеют прикладную ценность, поскольку формируют полноценную технологическую и методическую основу для синтеза сплавов с улучшенными свойствами и исследованию их свойств. На основе выполненных экспериментальных исследований установлены оптимальные концентрации добавок лантана, церия и празеодима в алюминиевом сплаве $\text{AlMg5.5Li2.1Zr0.15}$ типа дюралюмин, повышающих его коррозионную стойкость.

На основе проведенных исследований был получен малый патент Республики Таджикистан, № TJ 1678 от 20.02.2026г.

Методы исследования и использованная аппаратура:

- метод металлографии для проведения микроструктурного анализа сплавов (микроскоп марки КОРРАСЕ-L3230-2K);
- метод Бринелля для определения твёрдости металлов (твёрдомер марки HBRV-187.5D);
- метод исследования теплоёмкости сплавов в режиме «охлаждения» с использованием автоматической регистрации температуры образца от времени охлаждения;
- метод термогравиметрии для изучения кинетики процессов окисления сплавов;
- рентгенофазовый анализ продуктов окислений сплавов на приборе ДРОН-3М;
- потенциостатический метод для изучения анодных свойств сплавов (потенциостат ПИ 50-1.1);

Основные положения, выносимые на защиту:

- изменение микроструктуры и механических свойств сплава $\text{AlMg5.5Li2.1Zr0.15}$, в результате легирования;
- влияния малых добавок элементов La, Ce и Pr а также температуры на теплоёмкость и термодинамические функции сплава $\text{AlMg5.5Li2.1Zr0.15}$;
- изменения в энергетических и кинетических параметрах процесса окисления сплава $\text{AlMg5.5Li2.1Zr0.15}$ в результате легирования элементами La, Ce и Pr;
- механизм протекания окисления образцов в атмосфере воздуха, состав образующихся оксидов и их влияние на кинетику процесса;
- Анодные свойства и скорость коррозии сплава $\text{AlMg5.5Li2.1Zr0.15}$ с малыми добавками La, Ce и Pr в жидком растворе NaCl;

- составы сплавов с оптимальным количеством легирующего компонента, способствующих улучшению коррозионных свойств сплава AlMg5.5Li2.1Zr0.15 типа дюралюмин.

Степень достоверности научных результатов. Для проведения экспериментальных работ были использованы современные научные приборы и оборудования, отвечающие современным требованиям. Все работы проведены в лабораторных условиях с соблюдением правил проведения научных исследований.

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, субструктуры 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».

Личный вклад автора заключается в формулировке цели и задач исследования, разработке плана проведения и методики экспериментов, проведении физико-химических, коррозионных и теплофизических испытаний, обработке и интерпретации полученных экспериментальных данных, формулировании научных выводов.

Результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на следующих научных конференциях: XVIII Нумановские чтения «Развитие современной химии и её теоретические и практические аспекты» (Душанбе - 2023); Межд. науч.-практ. конф. «Развитие математических, точных и естественных наук в современном времени: проблемы и перспективы» Дангаринский государственный университет (Дангара - 2023); XIX Нумановские чтения «Развитие фундаментальной и прикладной химии и её вклад в индустриализацию страны» Институт химии имени В.И. Никитина (Душанбе - 2024); Межд. науч. конф. «Вопросы физической и координационной химии» (Душанбе - 2024); Межд. научно-практ. конф. на тему «Знание изучения естественных, точных и математических наук в развитии медицинской технологии» Технический колледж ТТУ имени акад. М.С. Осими (Душанбе - 2024); Межд. научно-практ. конф. под названием «Актуальные проблемы развития текстильной промышленности Республики Таджикистан в период ускоренной индустриализации». Межд. научно – практ. конф. на тему

«Цифровая индустрия и развитие энергетики глазами ученых и исследователей» празднованию Дня таджикской науки, а также объявленной 2020-2040 годы – «Двадцатилетием изучения и развития естественных, точных и математических дисциплин в области науки и образования» Министерство энергетики и водных ресурсов республики Таджикистан Институт энергетики Таджикистан (Бохтар - 2025); Респ. науч-практ. конф. «Роль и использование достижений естественных, точных и математических наук в производстве» (Душанбе - 2023); Респ. науч-практ. конф. «Развитие и достижения физической науки в годы независимости», посвящённой 32-летию Государственной независимости Республики Таджикистан; Респ. науч-практ. Конф. «Актуальные проблемы и перспективы развития естественных и точных наук»; Мат. Респ. науч-практ. конф XIX Нумановские чтения «Развитие фундаментальной и прикладной химии и её вклад в индустриализацию страны»;

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 24 печатных работ, из них 11 в рецензируемых изданиях рекомендованных ВАК РФ, 2 статьи вошли в БД Scopus. Получен малый патент Республики Таджикистан (№ TJ 1678).

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа изложена на 162 страницах машинописного текста, включает 67 рисунка, 54 таблиц, и состоит из 4 глав, выводов, приложения и списка литературы из 109 источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе представлен обзор литературы по теме исследования. Описаны области применения и свойства алюминиевых сплавов, их теплофизические свойства, особенности процесса окисления, а также, коррозионно-электрохимического поведения алюминиевых сплавов в различных средах. Поиск сведений по влиянию редкоземельных элементов цериевой подгруппы на свойства сплава $AlMg_{5.5}Li_{2.1}Zr_{0.15}$ показал отсутствие исследований, проведенных в данном направлении. И нами была поставлена цель синтезировать новые сплавы с добавлением РЗМ (La, Ce и Pr) и исследовать комплекс свойств, которые могут быть полезны как новые знания об этой группе сплавов, так и для практического применения в промышленности.

ГЛАВА II. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ, ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА $AlMg_{5.5}Li_{2.1}Zr_{0.15}$ ТИПА ДЮРАЛЮМИН С ЛАНТАНОМ, ЦЕРИЕМ И ПРАЗЕОДИМОМ

Исследование микроструктуры является одним из главных анализов при исследовании свойств сплавов. Микроструктурный анализ критически важен, так как он связывает внутреннее строение сплава с его реальными эксплуатационными свойствами. Этот метод позволяет оценить размер зерен,

фазовый состав и дефекты, которые напрямую определяют прочность, пластичность и долговечность материала.

Для исследования микроструктуры исследуемых образцов из полученного расплава отливались цилиндрические образцы диаметром 10-16 мм и толщиной 5-10 мм. Каждый образец предварительно отшлифовывали, обезжиривали спиртом и погружали в 0.05%-ный HF. Время травления составляло от 10 до 20 с. После травления микрошлиф промывали в проточной воде и тщательно высушивали прижатием к чистой фильтровальной бумаге. Микроструктуру алюминиевого сплава AlMg5.5Li2.1Zr0.15 типа дюралюмин с лантаном, церием и празеодимом исследовали на световом микроскопе марки КОРРАСЕ-L3230-2К. На рис. 1 представлены микроструктура алюминиевого сплава AlMg5.5Li2.1Zr0.15 с лантаном, церием и празеодимом. Эти рисунки отчетливо показывают значительное изменение в микроструктуре вследствие добавления лантана, церия и празеодима.

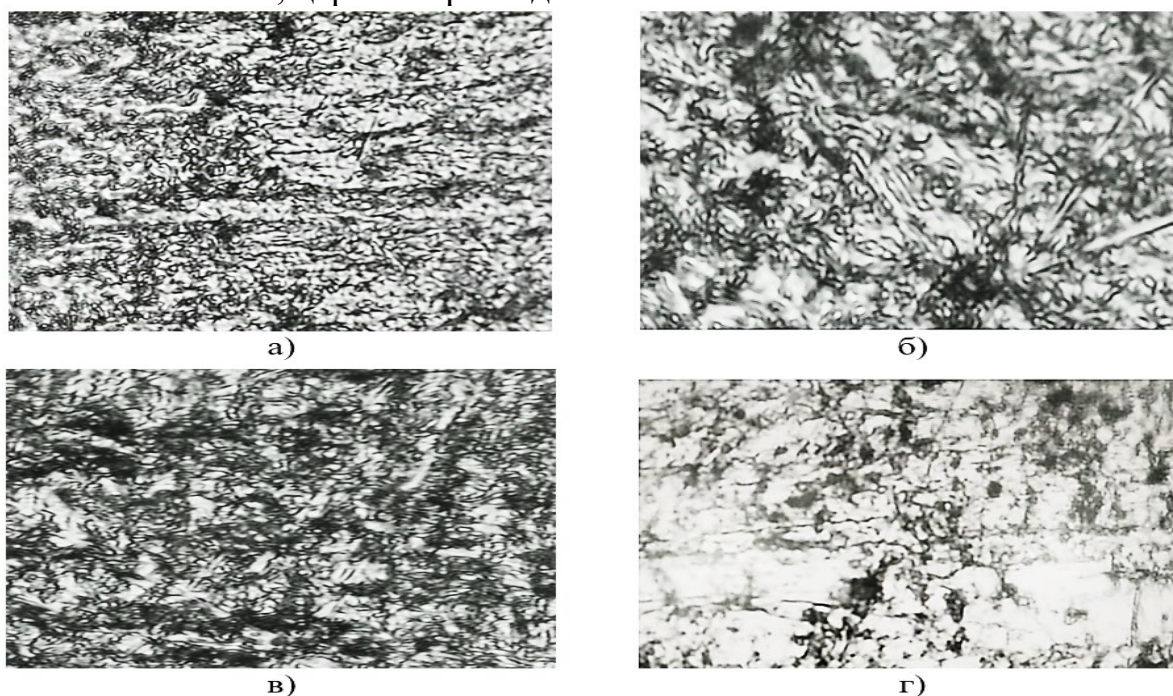


Рисунок 1- Микроструктура (x500) алюминиевого сплава AlMg5.5Li2.1Zr0.15 типа дюралюмин (а) с 1,0 мас.% лантаном(б), церием (в) и празеодимом(г)

Одной из наиболее распространенных характеристик, определяющих качество металлов и сплавов, возможность их применения в различных конструкциях и при различных условиях работы, является твердость. В данной работе твердость сплавов измерили согласно методу Бринелля с использованием микроскопа HBRV-187.5D. Испытанию подвергались образцы толщиной 10 мм, и диаметром 16 мм.

Твердость определяется по следующей формуле:

$$HB = \frac{P}{S} = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}, \frac{\text{кгс}}{\text{мм}^2} \quad (1)$$

где P – усилие, действующее на шарик, кг; S – площадь поверхности отпечатка, мм²; D- диаметр шарика, мм; d – диаметр отпечатка, мм.

Существует приближенная зависимость предела прочности металла и твердости по Бринеллю:

$$\sigma_B = k \cdot HB, \text{ МПа.} \quad (2)$$

Значение k для алюминиевых сплавов равно 0,25.

С учётом этого, рассчитаны значения σ_B сплавов. Результаты расчетов представлены в таблице 1.

Таблица 1- Твёрдость и прочность алюминиевого сплава AlMg5.5Li2.1Zr0.15 типа дюралюмин с лантаном, церием и празеодимом

Легирующий элемент	Содержание добавки в сплаве, мас. %	*Твёрдость HB, МПа	Прочность, МПа
-	0.0	261.92	65.48
La	0.01	259.92	64.98
	0.1	256.16	64.04
	0.5	253.28	63.32
	1.0	251.56	62.89
Ce	0.01	258.08	64.52
	0.1	254.20	63.55
	0.5	251.80	62.95
	1.0	248.72	62.18
Pr	0.01	256.08	64.02
	0.1	251.92	62.98
	0.5	248.40	62.10
	1.0	246.72	61.68

*среднее значение по результатам 3 измерений.

Как видно при добавке лантана, церия и празеодима до 1,0 мас. % твердость и прочность исходного сплава уменьшается.

Одним из методов, позволяющих корректно установить теплоёмкость $C_p^0 = f(T)$ металлов и сплавов, в области высоких температур является метод сравнения скоростей охлаждения двух образцов, исследуемого и эталонного, по закону охлаждения Ньютона – Рихмана.

Для этих исследований были изготовлены образцы в виде цилиндра длиной 30 мм и диаметром 16 мм с высверленными каналами с одного конца, в которые вставляются термопары. Каждый из них нагревается до достаточно высокой температуры, а затем идет процесс охлаждения, через определенные промежутки времени температура записывается, т.е. снимается кривая охлаждения.

Для двух образцов одинакового размера при допущении площади их поверхности $S_1 = S_2$ и коэффициенты теплоотдачи $\alpha_1 = \alpha_2$, теплоемкость определяется по формуле

$$C_{p_2}^0 = C_{p_1}^0 \cdot \frac{m_1}{m_2} \cdot \frac{\left(\frac{dT}{dt}\right)_1}{\left(\frac{dT}{dt}\right)_2}, \quad (3)$$

где $m_1 = \rho_1 V_1$ –масса первого образца;

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

$(\frac{dT}{d\tau})_1, (\frac{dT}{d\tau})_2$ – скорости охлаждения образцов из эталона и исследуемых сплавов при данной температуре.

Для определения скорости охлаждения строят кривые охлаждения исследуемых образцов. Кривая охлаждения представляет собой зависимость температуры образца от времени при охлаждении его в неподвижном воздухе. Экспериментально полученные кривые охлаждения образцов из алюминиевого сплава AlMg5.5Li2.1Zr0.15 типа дюралюмин с лантаном представлены на рис. 2а. Шаг измерения температуры составил 0,1 К. Временной интервал фиксации температуры составлял 10 с. Относительная ошибка измерения температуры в интервале от 313 К до 673 К составляла $\pm 1\%$, а при более 673 К $\pm 2,5\%$. Погрешность измерения теплоемкости по предлагаемой методике не превышает 4%. В нашем случае погрешность не превышала 1%. Обработка результатов производилась с помощью программы MS Excel, а графики строились с помощью программы Sigma Plot 10.0. Коэффициент корреляции составил не менее 0,9999.

Полученные кривые охлаждения образцов из указанных сплавов описываются уравнением вида:

$$T = ae^{-b\tau} + pe^{-k\tau}, \quad (4)$$

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

Дифференцируя уравнение (4) по τ , получаем уравнение для определения скорости охлаждения образцов:

$$\frac{dT}{d\tau} = -abe^{-b\tau} - pke^{-k\tau} \quad (5)$$

Значения коэффициентов a, b, p, k, ab, pk в уравнении (5) для исследованных сплавов приведены в таблице 2. Кривые зависимости скорости охлаждения от температуры для образцов из алюминиевого сплава AlMg5.5Li2.1Zr0.15 типа дюралюмин, легированного лантаном представлены на рис. 2б.

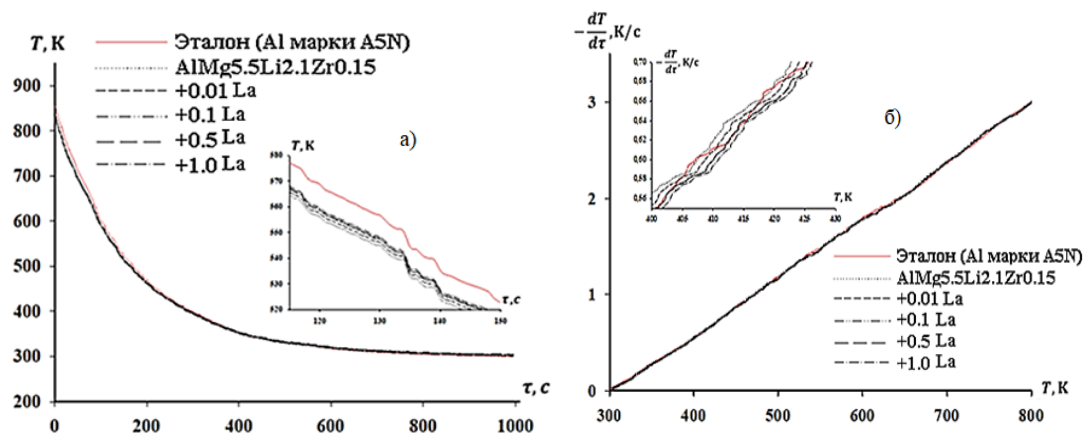


Рисунок 2- График зависимости температуры образца от времени охлаждения(а) и температурная зависимость скорости охлаждения для образцов (б) из алюминиевого сплава AlMg5.5Li2.1Zr0.15 типа дюралюмин с лантаном и эталона (Al А5N)

Таблица 2- Значения коэффициентов a , b , p , k , ab , pk в уравнении (5) для алюминиевого сплава AlMg5.5Li2.1Zr0.15 типа дюралюмин с лантаном и эталона (Al A5N)

Содержание лантана в сплаве, мас. %	a, K	$b \cdot 10^{-3}, c^{-1}$	p, K	$k \cdot 10^{-5}, c^{-1}$	$ab \cdot 10^{-1}, Kc^{-1}$	$pk \cdot 10^{-2}, Kc^{-1}$
0.0	517,44	6.13	322,88	4.33	3,17	1,40
0.01	517,45	6.13	329,68	4.24	3,17	1,40
0.1	517,43	6.13	330,68	4.23	3,17	1,40
0.5	517,46	6.13	330,88	4.22	3,17	1,40
1.0	517,47	6.13	331,98	4.21	3,17	1,40
Эталон	540,11	6.12	325,18	5.42	3,31	1,76

Далее по рассчитанным значениям величин скоростей охлаждения образцов по уравнению (3) была вычислена удельная теплоёмкость алюминиевого сплава AlMg5.5Li2.1Zr0.15 типа дюралюмин с лантаном. Получено следующее общее уравнение температурной зависимости удельной теплоёмкости сплавов.

$$C_p^0 = a + bT + cT^2 + dT^3 \quad (6)$$

Полученные коэффициенты температурной зависимости удельной теплоёмкости эталона и алюминиевого сплава AlMg5.5Li2.1Zr0.15 типа дюралюмин с лантаном, представлены в таблице 3.

Таблица 3- Значения коэффициентов a , b , c , d в уравнении (6) для алюминиевого сплава AlMg5.5Li2.1Zr0.15 типа дюралюмин с лантаном и эталона (Al A5N)

Содержание лантана в сплаве, мас.%	$a,$ $Дж/(кг \cdot K)$	$b,$ $Дж/(кг \cdot K^2)$	$c \cdot 10^{-3},$ $Дж/(кг \cdot K^3)$	$d \cdot 10^{-7},$ $Дж/(кг \cdot K^4)$	Коэффициент корреляции R^2
0.0	673,80	1,43	8,12	8,67	0,999
0.01	673,66	1,43	8,11	8,66	0,999
0.1	673,20	1,43	8,02	8,60	0,999
0.5	671,16	1,42	7,61	8,32	0,999
1.0	668,61	1,42	7,10	7,98	0,999
Эталон	690,34	1,01	7,00	9,13	1,000

Результаты расчёта C_p^0 для сплавов по формулам (3) и (6) через 100 К представлены в таблице 4 и на рис. 3а.

Таблица 4 - Температурная зависимость удельной теплоёмкости (Дж/(кг·К)) алюминиевого сплава AlMg5.5Li2.1Zr0.15 типа дюралюмин с лантаном и эталона (Al A5N)

Содержание лантана в сплаве, мас. %	T, K					
	300	400	500	600	700	800
0,0	965,71	1021,00	1067,14	1111,25	1160,47	1221,90
0,01	965,55	1020,83	1066,96	1111,07	1160,27	1221,69
0,1	964,92	1020,15	1066,25	1110,32	1159,49	1220,86
0,5	962,09	1017,15	1063,09	1107,00	1155,98	1217,14
1,0	958,53	1013,36	1059,09	1102,79	1151,54	1212,43
Эталон	903,70	949,58	991,97	1036,35	1088,20	1153,00

Используя вычисленные данные по теплоёмкости алюминиевого сплава AlMg5.5Li2.1Zr0.15 типа дюралюмин с лантаном и экспериментально полученные величины скорости охлаждения образцов, был рассчитан коэффициент теплоотдачи α (Вт/(К·м²)) для сплавов по следующей формуле.

$$\alpha = \frac{C_p^0 m \frac{dT}{d\tau}}{(T - T_0) \cdot S} \quad (7)$$

Для алюминиевого сплава AlMg5.5Li2.1Zr0.15 типа дюралюмин с лантаном и эталона температурная зависимость коэффициента теплоотдачи имеет вид (рис.3б). Добавки лантана и температура увеличивают коэффициент теплоотдачи сплава AlMg5.5Li2.1Zr0.15.

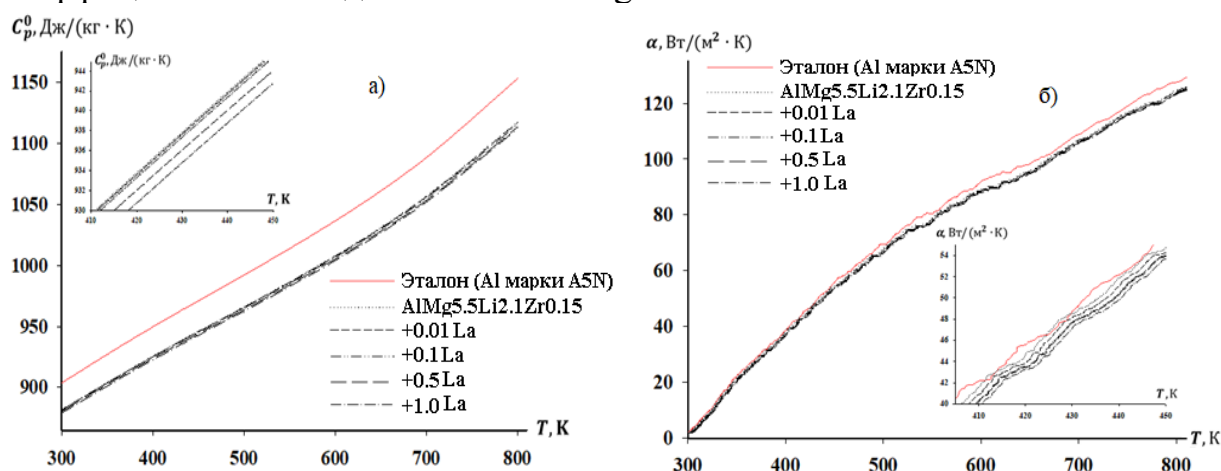


Рисунок 3 - Зависимость удельной теплоёмкости (а) и коэффициента теплоотдачи (б) от температуры для образцов из алюминиевого сплава AlMg5.5Li2.1Zr0.15 типа дюралюмин с лантаном и эталона (Al A5N)

Для расчёта температурной зависимости изменений энтальпии, энтропии и энергии Гиббса по (8) - (10) были использованы интегралы от удельной теплоёмкости по уравнению (6):

$$[H^0(T) - H^0(T_0)] = \alpha(T - T_0) + \frac{b}{2}(T^2 - T_0^2) + \frac{c}{2}(T^3 - T_0^3) + \frac{d}{2}(T^4 - T_0^4); \quad (8)$$

$$[S^0(T) - S^0(T_0)] = a \ln \frac{T}{T_0} + b(T - T_0) + \frac{c}{2}(T^2 - T_0^2) + \frac{b}{3}(T^3 - T_0^3); \quad (9)$$

$$[G^0(T) - G^0(T_0)] = [H^0(T) - H^0(T_0)] - T[S^0(T) - S^0(T_0)], \quad (10)$$

где $T_0 = 298.15$

Результаты расчёта изменений термодинамических функций алюминиевого сплава AlMg5.5Li2.1Zr0.15 типа дюралюмин с лантаном представлены в таблице 5.

По результатам, представленным в таблице видно, что энтальпия и энтропия алюминиевого сплава AlMg5.5Li2.1Zr0.15 типа дюралюмин с лантаном от температуры увеличиваются, а от содержания лантана уменьшаются. Значение энергии Гиббса при этом имеет обратную зависимость.

В таблицах 6 и 7 обобщены результаты исследования теплоемкости и изменений термодинамических функций алюминиевого сплава AlMg5.5Li2.1Zr0.15 типа дюралюмин с лантаном, церием и празеодимом на примере сплавов, содержащих 1.0 мас. % добавки. Видно, что с ростом температуры теплоемкость, энтальпия и энтропия сплавов увеличиваются, а значения энергии Гиббса уменьшается.

Таблица 5 - Температурная зависимость изменений термодинамических функций алюминиевого сплава AlMg5.5Li2.1Zr0.15 типа дюралюмин с лантаном и эталона (Al A5N)

Содержание лантана в сплаве, мас. %	Т, К					
	300	400	500	600	700	800
	$[H^0(T) - H^0(T_0^*)]$, кДж/кг для сплавов					
0,0	1,7855	101,2272	205,6808	314,5881	428,1025	547,0900
0,01	1,7852	101,2102	205,6464	314,5354	428,0309	546,9983
0,1	1,7840	101,1436	205,5107	314,3271	427,7462	546,6330
0,5	1,7788	100,8468	204,9056	313,3974	426,4749	545,0001
1,0	1,7722	100,4724	204,1416	312,2233	424,8688	542,9374
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	0,0059	0,2916	0,5245	0,7229	0,8978	1,0566
0,01	0,0059	0,2916	0,5244	0,7228	0,8977	1,0564
0,1	0,0059	0,2914	0,5241	0,7223	0,8971	1,0557
0,5	0,0059	0,2905	0,5225	0,7202	0,8944	1,0526
1,0	0,0059	0,2895	0,5206	0,7175	0,8911	1,0486
Эталон	0,0055	0,2719	0,4884	0,6731	0,8366	0,9860
	$[G^0(T) - G^0(T_0)]$, кДж/кг для сплавов					
0,0	-0,0055	-15,4389	-56,5971	-119,209	-200,415	-298,251
0,01	-0,0055	-15,4363	-56,5876	-119,189	-200,381	-298,201
0,1	-0,0055	-15,4262	-56,5503	-119,111	-200,249	-298,004
0,5	-0,0055	-15,3809	-56,3842	-118,76	-199,658	-297,123
1,0	-0,0054	-15,3239	-56,1747	-118,318	-198,912	-296,010
Эталон	-0,0051	-14,4125	-52,7590	-111,054	-186,69	-277,922

Следует отметить, что по мере перехода от сплавов с лантаном к сплавам, с церием, удельная теплоёмкость, коэффициент теплоотдачи, энтальпия, энтропия сплава AlMg5.5Li2.1Zr0.15 увеличивается. Это объясняется ростом степени гетерогенности структуры исходного сплава при легировании лантаном, церием и празеодимом.

Таблица 6 - Температурная зависимость удельной теплоёмкости (Дж/(кг·К))алюминиевого сплава AlMg5.5Li2.1Zr0.15 типа дюралюмин с 1.0 мас.% лантаном, церием и празеодимом

Т, К	Т			
	Содержание РЗМ в сплаве, мас. %			
	0,0	1,0 La	1,0 Ce	1,0 Pr
300	965,71	958,53	959,4496	958,4409
400	1021,00	1013,36	1013,533	1013,423
500	1067,14	1059,09	1059,114	1059,266
600	1111,25	1102,79	1102,972	1103,056
700	1160,47	1151,54	1151,883	1151,883
800	1221,90	1212,43	1212,626	1212,835

Таблица 7- Температурная зависимость изменений энтальпии, энтропии и энергии Гиббса для алюминиевого сплава AlMg5.5Li2.1Zr0.15 типа дюралюмин с 1.0 мас.% лантаном, церием и празеодимом

Т, К	$[H^0(T) - H^0(T_0)]$, кДж/кг для сплава			
	Содержание РЗМ в сплаве, мас.%			
	0,0	1,0 La	1,0 Ce	1,0 Pr
300	1,7855	1,7722	1,773943	1,772054
400	101,2272	100,4724	100,5221	100,471
500	205,6808	204,1416	204,1971	204,1521
600	314,5881	312,2233	312,2876	312,2558
700	428,1025	424,8688	424,9600	424,9313
800	547,0900	542,9374	543,0586	543,0366
Т, К	$[S^0(T) - S^0(T_0)]$, кДж/(кг·К) для сплава			
	Содержание РЗМ в сплаве, мас.%			
	0,0	1,0 La	1,0 Ce	1,0 Pr
300	0,0059	0,0059	0,005931	0,005925
400	0,2916	0,2895	0,289640	0,289486
500	0,5245	0,5206	0,520795	0,520654
600	0,7229	0,7175	0,717746	0,717629
700	0,8978	0,8911	0,891335	0,891223
800	1,0566	1,0486	1,048944	1,048840
Т, К	$[G^0(T) - G^0(T_0)]$, кДж/кг для сплава			
	Содержание РЗМ в сплаве, мас.%			
	0,0	1,0 La	1,0 Ce	1,0 Pr
300	-0,0055	-0,0054	-0,00549	-0,00549
400	-15,4389	-15,3239	-15,3338	-15,3232
500	-56,5971	-56,1747	-56,2005	-56,1747
600	-119,209	-118,318	-118,36	-118,322
700	-200,415	-198,912	-198,975	-198,925
800	-298,251	-296,010	-296,096	-296,035

В общем, удельная теплоёмкость и изменений термодинамических функции алюминиевого сплава AlMg5.5Li2.1Zr0.15 типа дюралюмин показали, что добавки лантана, церия и празеодима в изученном концентрационном интервале (0.01-1.0 мас. %) уменьшают указанные характеристики исходного сплава.

ГЛАВА III. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДОБАВОК ЛАНТАНА, ЦЕРИЯ И ПРАЗЕОДИМА НА КИНЕТИКУ ОКИСЛЕНИЯ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА AlMg5.5Li2.1Zr0.15 ТИПА ДЮРАЛЮМИН, В ТВЕРДОМ СОСТОЯНИИ

В этой главе приведены результаты исследования влияния добавок лантана, церия и празеодима на кинетику окисления алюминиевого сплава AlMg5.5Li2.1Zr0.15 типа дюралюмин в твердом состоянии. Для этого была синтезирована серия сплавов с содержанием от 0.01 до 1.0 мас.% РЗМ (La, Ce и Pr). Исследование проводили термогравиметрическим методом в атмосфере воздуха при температурах 723К, 773К, 823К. Результаты исследования приведены в таблице 8.

Таблица 8 - Кинетические и энергетические параметры процесса окисления алюминиевого сплава AlMg5.5Li2.1Zr0.15 типа дюралюмин с лантаном в твердом состоянии

Содержание лантана в сплаве, мас. %	Температура окисления, К	Скорость окисления $K \cdot 10^4$, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	Энергия активации, кДж/моль
0.0	723	2.25	155.5
	773	2.43	
	823	2.70	
0.01	723	2.33	152.7
	773	2.51	
	823	2.77	
0.1	723	2.39	149.1
	773	2.56	
	823	2.82	
0.5	723	2.45	146.0
	773	2.61	
	823	2.87	
1.0	723	2.51	142.9
	773	2.67	
	823	2.93	

Так, средняя скорость окисления исходного сплава при температурах 723К, 773К и 823 имеет величину $2,25 \cdot 10^{-2}$ и $2,70 \cdot 10^{-2} \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, соответственно, а для сплава с добавкой 0.5 мас.% лантана достигает величину $2,45 \cdot 10^{-2}$ и

$2,87 \cdot 10^{-2} \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ при тех же температурах. Энергия активации процесса окисления вышеуказанных сплавов при этом уменьшается, соответственно от 155,5 для исходного сплава до 142,9 кДж/моль для сплава содержащего 1.0 мас.% лантана.

На рисунке 4 приведены кинетические кривые, а на рисунке 5 приведены квадратичные кинетические кривые процесса окисления, характеризующие изменение массы во времени для алюминиевого сплава AlMg5.5Li2.1Zr0.15 типа дюралюмин содержащего 1.0 мас. % лантана. Представленные кривые были зафиксированы при температурах 723 К, 773 К, 823 К. Процесс окисления протекает с диффузионными затруднениями и заканчивается после 15-20 минут.

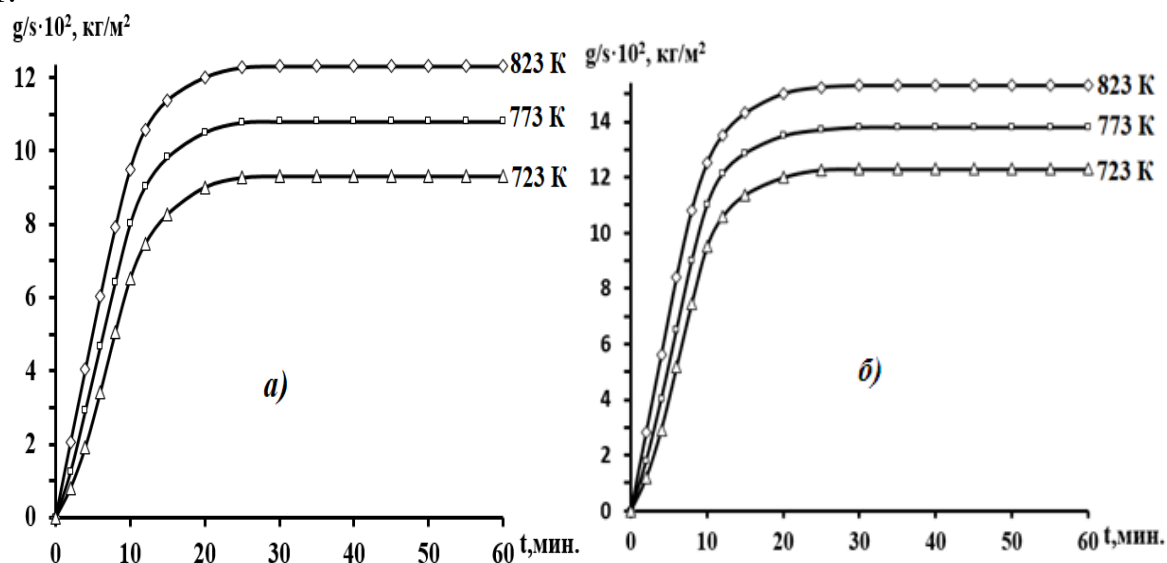


Рисунок 4 - Кинетические кривые окисления алюминиевого сплава AlMg5.5Li2.1Zr0.15 типа дюралюмин (а), легированного 1.0 мас. % лантаном (б)

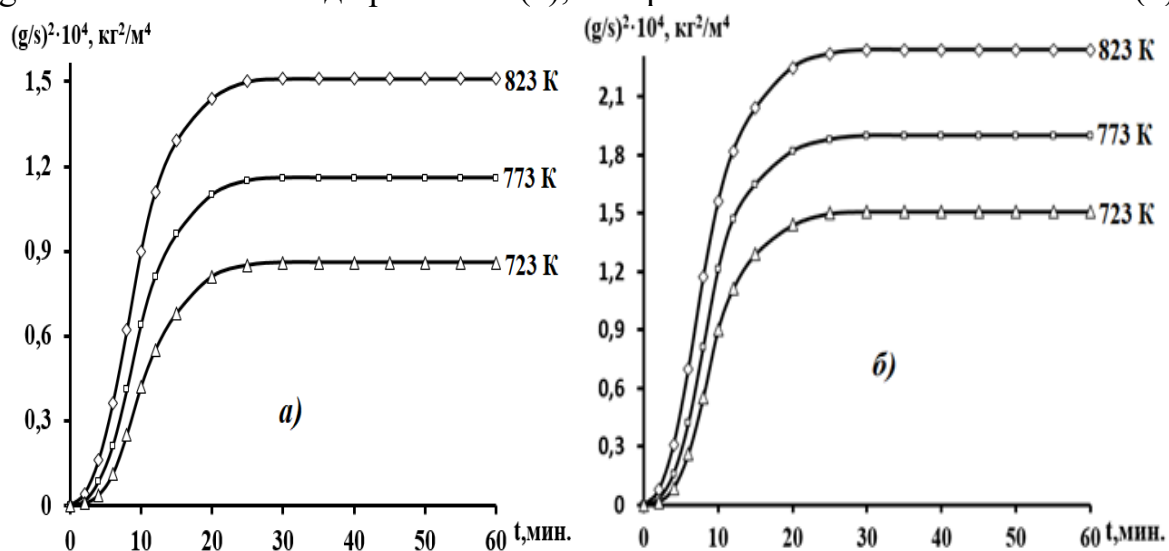


Рисунок 5 - Квадратичные кинетические кривые окисления алюминиевого сплава AlMg5.5Li2.1Zr0.15 типа дюралюмин (а), легированного 1.0 мас. % лантаном (б)

Таблица 9- Полиномы квадратичных кинетических кривых окисления
алюминиевого сплава AlMg5.5Li2.1Zr0.15 типа дюралюмин с лантаном в
твёрдом состоянии

Содержание лантана в сплаве, мас.%	Температура окисления, К	Полиномы квадратичных кинетических кривых окисления сплавов	Коэффициент регрессии R^2
0.0	723	$y = -0,7 \cdot 10^{-7}x^4 + 0,2 \cdot 10^{-3}x^3 - 2,31 \cdot 10^{-2}x^2 + 0,8133x$	0,982
	773	$y = -0,6 \cdot 10^{-3}x^4 + 0,5 \cdot 10^{-3}x^3 - 3,7 \cdot 10^{-2}x^2 + 1,0735x$	0,989
	823	$y = -0,6 \cdot 10^{-5}x^4 + 0,9 \cdot 10^{-3}x^3 - 5,3 \cdot 10^{-2}x^2 + 1,3589x$	0,995
0.01	723	$y = -0,6 \cdot 10^{-2}x^4 + 0,4 \cdot 10^{-3}x^3 - 3,38 \cdot 10^{-2}x^2 + 1,0373x$	0,980
	773	$y = -0,6 \cdot 10^{-5}x^4 + 0,8 \cdot 10^{-3}x^3 - 5,01 \cdot 10^{-2}x^2 + 1,3259x$	0,990
	823	$y = -0,6 \cdot 10^{-8}x^4 + 1,2 \cdot 10^{-3}x^3 - 6,91 \cdot 10^{-2}x^2 + 1,6437x$	0,997
0.1	723	$y = -0,6 \cdot 10^{-2}x^4 + 0,5 \cdot 10^{-3}x^3 - 3,69 \cdot 10^{-2}x^2 + 1,1061x$	0,979
	773	$y = -0,6 \cdot 10^{-5}x^4 + 0,9 \cdot 10^{-3}x^3 - 5,55 \cdot 10^{-2}x^2 + 1,419x$	0,993
	823	$y = -0,6 \cdot 10^{-8}x^4 + 1,3 \cdot 10^{-3}x^3 - 7,39 \cdot 10^{-2}x^2 + 1,7323xy$	0,997
0.5	723	$y = -0,6 \cdot 10^{-3}x^4 + 0,5 \cdot 10^{-3}x^3 - 3,88 \cdot 10^{-2}x^2 + 1,1594x$	0,978
	773	$y = -0,6 \cdot 10^{-5}x^4 + 0,9 \cdot 10^{-3}x^3 - 5,68 \cdot 10^{-2}x^2 + 1,4668x$	0,991
	823	$y = -0,5 \cdot 10^{-1}x^4 + 1,5 \cdot 10^{-3}x^3 - 8,03 \cdot 10^{-2}x^2 + 1,8402x$	0,997
1.0	723	$y = -0,6 \cdot 10^{-3}x^4 + 0,6 \cdot 10^{-3}x^3 - 426 \cdot 10^{-2}x^2 + 1,2368x$	0,980
	773	$y = -0,6 \cdot 10^{-6}x^4 + 1 \cdot 10^{-3}x^3 - 5,86 \cdot 10^{-2}x^2 + 1,5204x$	0,987
	823	$y = -0,6 \cdot 10^{-9}x^4 + 1,4 \cdot 10^{-3}x^3 - 7,87 \cdot 10^{-2}x^2 + 1,8524x$	0,995

Кинетические и энергетические параметры процесса окисления сплавов зависят от структуры образующей оксидной плёнки. Результаты математической обработки кинетических кривых окисления сплавов обобщены в таблице 9.

Полиномы квадратичных кинетических кривых окисления алюминиевого сплава AlMg5.5Li2.1Zr0.15 типа дюралюмин с лантаном в твёрдом состоянии свидетельствуют, что процесс окисления подчиняется гиперболическому уравнению типа $y = k \cdot x^n$, где значение $n = 1 \div 4$. В данном уравнении y – это привес массы образцов (кг/м²), x – продолжительность процесса окисления в минутах.

Изохроны окисления сплавов, соответствующих температуре 723-823К, приведены на рисунке 6. Отмечается тенденция к увеличению скорости окисления по мере роста содержания лантана в исходном сплаве, что

сопровождается уменьшением величины кажущейся энергии активации процесса окисления.

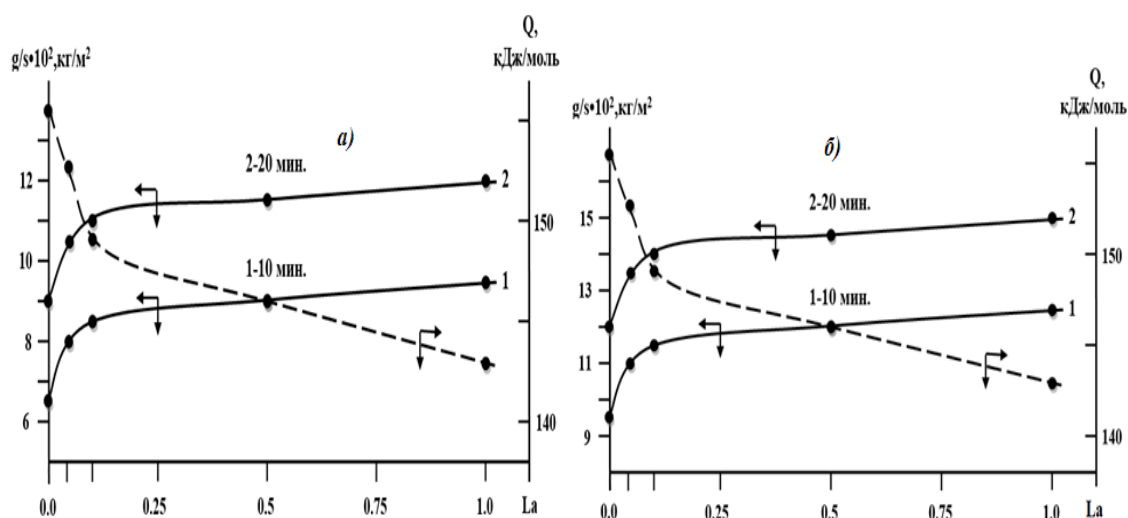


Рисунок 6- Изохроны окисления алюминиевого сплава AlMg5.5Li2.1Zr0.15 типа дюралюмин с лантаном при 723 К (а) и 823К (б)

На рисунке 7 приведены зависимости $-\lg K = f(1/T)$ для алюминиевого сплава AlMg5.5Li2.1Zr0.15 типа дюралюмин, легированного лантаном. Видно, что в целом в координатах $-\lg K = f(1/T)$ кривые имеют прямолинейный характер и кривые относящиеся к сплавам легированным лантаном располагаются выше кривых исходного алюминиевого сплава AlMg5.5Li2.1Zr0.15 типа дюралюмин. Сплавы, легированные лантаном, характеризуются более высоким значением истинной скорости окисления.

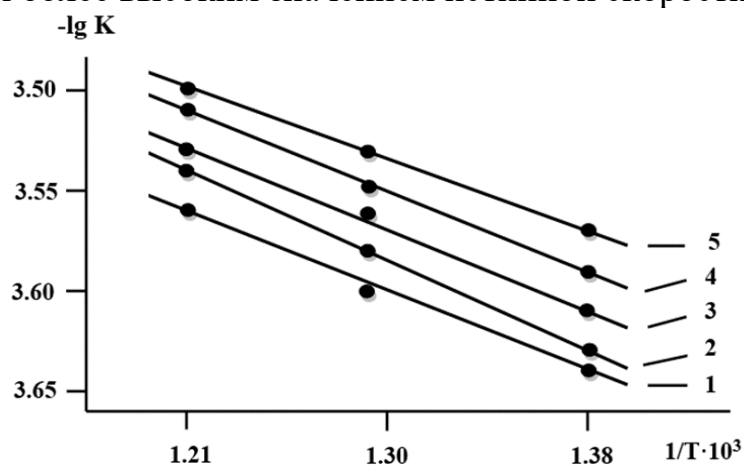


Рисунок 7 - Зависимость $-\lg K = f(1/T)$ для алюминиевого сплава AlMg5.5Li2.1Zr0.15 типа дюралюмин с лантаном, мас. %: 0.0(1); 0.01(2); 0.1(3); 0.5(4); 1.0(5)

По результатам рентгенофазового анализа продуктов окисления алюминиевого сплава AlMg5.5Li2.1Zr0.15 типа дюралюмин (а) с лантаном (б), церием (в) и празеодимом (г) установлено, что при окислении образуются оксиды следующих составов: MgAl_2O_4 ; MgAl_2O_4 ; Li_2O ; $(\text{Mg}_{0.4}\text{Al}_{0.6}) \text{Al}_{1.8}\text{O}_4$; Al_2O_3 ; $(\text{Mg}_{0.4}\text{Al}_{0.6}) \text{Al}_{1.8} \text{O}_4$; ZrO_2 ; $\text{Mg} \text{Al}_2\text{O}_4$; $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}(\text{Mg}_{0.75}\text{Al}_{0.25}) (\text{Al}_{0.875}\text{Mg}_{0.125})_2\text{O}_4$; $\text{Zr}_{0.952} \text{O}_2$; $\text{Al}_{12} \text{Mg}_{17}$; $(\text{Mg}_{0.64}\text{Al}_{0.36}) (\text{Al}_{0.82}\text{Mg}_{0.18})_2\text{O}_4$; $\text{Al}_2 \text{Mg} \text{O}_4$; $\text{La}_{1.52}$

$\text{Al}_{1.68}\text{O}_{4.04}$; Zr_3O , $(\text{Mg}_{0.68}\text{Al}_{0.32})(\text{Al}_{0.84}\text{Mg}_{0.16})_2\text{O}_4$; MgAl_2O_4 ; LiAl_5O_8 ; $(\text{Mg}_{0.4}\text{Al}_{0.6})\text{Al}_{1.8}\text{O}_4$; CeO_2 ; $\text{ZrO}_{1.97}$, MgAl_2O_4 ; $\text{Zr}_{0.875}\text{Mg}_{0.125}\text{O}_{1.875}$; $\text{Zr}_{0.932}\text{O}_2$; $\text{Pr}_{0.53}\text{Al}_{11}\text{O}_{16.96}$; Zr_2O_3 ; MgO ; $\text{Pr}_{0.55}\text{Al}_{10.92}\text{O}_{16.86}$; $\text{Pr}_{12}\text{O}_{22}$ (рис. 8).

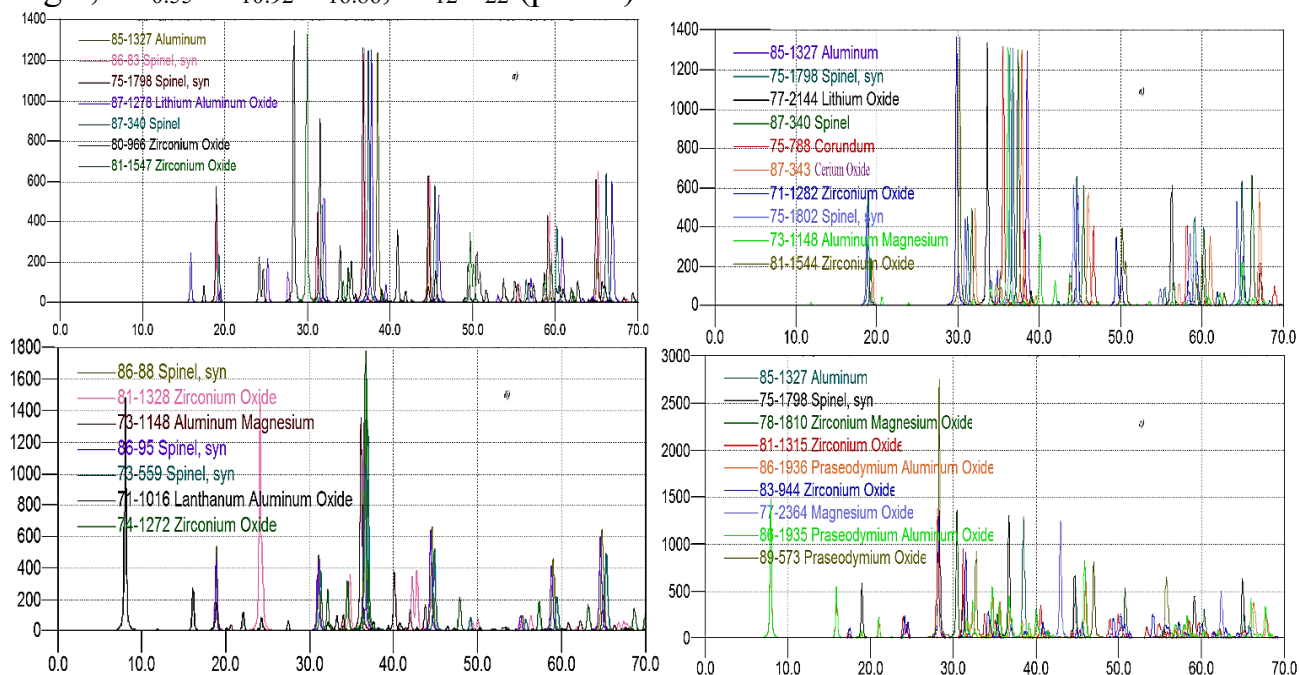


Рисунок 8 - Дифрактограммы продуктов окисления алюминиевого сплава $\text{AlMg5.5Li2.1Zr0.15}$ типа дюралюмин (а) с лантаном (б), церием (в) и празеодимом (г)

В таблице 10 представлены величины энергии активация процесса окисления алюминиевого сплава $\text{AlMg5.5Li2.1Zr0.15}$ типа дюралюмин, легированного лантаном, церием и празеодимом. Видно, что по мере перехода от сплавов с лантаном к сплавам с церием и празеодимом происходит некоторое снижение величины энергии активации сплавов. В целом наблюдается снижение величины эффективной энергии активации исходного сплава при легировании алюминиевого сплава $\text{AlMg5.5Li2.1Zr0.15}$ лантаном, церием и празеодимом в изученном концентрационном диапазоне.

Таблица 10 - Сравнение эффективной энергии активация (кДж/моль) процесса высокотемпературного окисления алюминиевого сплава $\text{AlMg5.5Li2.1Zr0.15}$ типа дюралюмин с лантаном, церием и празеодимом, в твердом состоянии

Содержание РЗМ сплаве, мас. %	Сравнение эффективной энергии активация				
	Содержание РЗМ в сплаве, мас. %				
	$\text{AlMg5.5Li2.1Zr0.15}$	0.01	0.1	0.5	1.0
La	155.5	152.7	149.1	146.0	142.9
Ce		148.0	144.9	141.1	138.5
Pr		143.1	139.5	135.0	132.9

Так, результаты исследования показывают, что на кинетические и энергетические параметры процесса окисления исследованных сплавов

наиболее существенно влияет их химический состав и температура. Каждый из рассмотренных легирующих компонентов алюминиевого сплава $\text{AlMg5.5Li2.1Zr0.15}$ типа дюралюмин имеет определённую область концентраций, в границах которой на окисляемость алюминиевого сплава $\text{AlMg5.5Li2.1Zr0.15}$ типа дюралюмин легирование проявляет наиболее сильное воздействие. При добавке 1.0 мас. % легирующего компонента к сплаву алюминиевого сплава $\text{AlMg5.5Li2.1Zr0.15}$ типа дюралюмин отмечается повышение удельной массы оксида и более низкие энергетические затраты.

ГЛАВА IV. КОРРОЗИОННО-ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА $\text{AlMg5.5Li2.1Zr0.15}$ ТИПА ДЮРАЛЮМИН, ЛЕГИРОВАННОГО ЛАНТАНОМ, ЦЕРИЕМ И ПРАЗЕОДИМОМ

Коррозионно-электрохимические свойства синтезированных сплавов исследовали на потенциостате ПИ-50-1-1 потенциостатическим методом в потенциодинамическом режиме при скорости развертки потенциала 2 мВ/с, с помощью программатора ПР-8 и самозаписа ЛКД-4. Температура раствора поддерживалась постоянной 20°C, с помощью термостата МЛШ-8. Электродом сравнения служил хлорид серебряный, а вспомогательным – платиновый.

Потенциостатическое исследование электрохимических и коррозионных свойств новых алюминиевых сплавов были проведены в среде раствора NaCl различной концентрации.

При электрохимических исследованиях образцы поляризовали в положительном направлении, исходя от установившегося потенциала (потенциал свободной коррозии или стационарного $E_{\text{св.кор.}}$), до значения потенциала, при котором происходит резкое возрастание плотности тока до $-lgi = 1 \text{ A/m}^2$ (Рис. 9, кривая I). Образцы далее поляризовали в обратном направлении (до значения потенциала $-1,2 \text{ В}$) (Рис. 9, кривые II и III), что позволило подщелачивать при электродной поверхности образца и снять оксидную плёнку с поверхности электрода. Под конец, образцы снова поляризовали в положительном направлении (Рис. 9, кривая IV). При таком переходе фиксируется потенциал питтингообразования ($E_{\text{п.о.}}$).

По ходу прохождения полной поляризационной кривой определяли следующие электрохимические параметры:

– $E_{\text{ст.}}$ или $E_{\text{св.кор.}}$ – стационарный потенциал или потенциал свободной коррозии;

– $E_{\text{рп.}}$ – потенциал репассивации;

– $E_{\text{кор.}}$ – потенциал коррозии;

– $E_{\text{п.о.}}$ – потенциал питтингообразования;

– $i_{\text{кор.}}$ – ток коррозии.

Плотность тока рассчитывался из тафелевских участков катодной кривой, имеющей угол наклона $b_k=0.12$. Скорость коррозии, являющаяся функцией тока коррозии, определялась по формуле:

$$K = i_{\text{кор.}} \cdot k, \quad (11)$$

где k – электрохимический эквивалент алюминия, среднее значение которого составляет 0.335 г/А·ч.

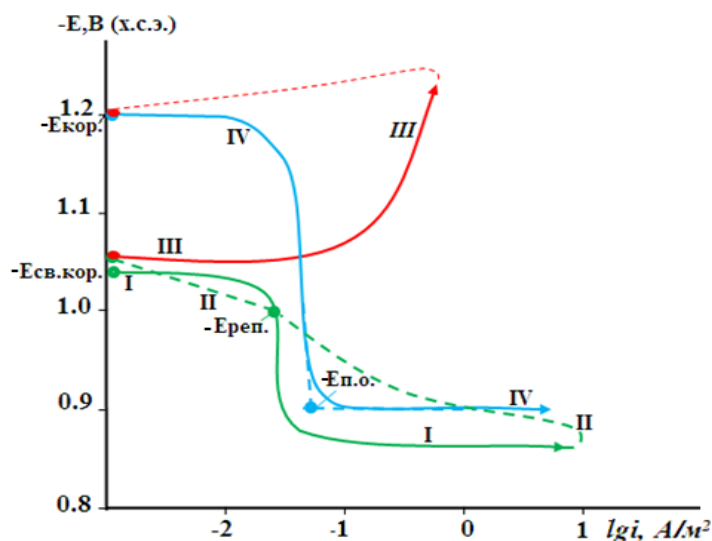


Рисунок 9 - Полная поляризационная (2мВ/с) кривая алюминиевого сплава AlMg5.5Li2.1Zr0.15 типа дюралюмин, в среде раствора 3.0%-ного NaCl

Обобщённые результаты исследований коррозионно-электрохимических свойств алюминиевого сплава AlMg5.5Li2.1Zr0.15 типа дюралюмин с 1.0 масс.% лантаном, церием и празеодимом представлены в таблицах 11 и 12.

Таблица 11 - Потенциалы (х.с.э.) свободной коррозии и питтингообразования алюминиевого сплава AlMg5.5Li2.1Zr0.15 типа дюралюмин, легированного лантаном, церием и празеодимом в среде раствора NaCl

Среда NaCl,	Содержание La, Ce и Pr в сплаве	Сплавы с La		Сплавы с Ce		Сплавы с Pr	
		−E _{св.кор.}	−E _{п.о.}	−E _{св.кор.}	−E _{п.о.}	−E _{св.кор.}	−E _{п.о.}
масс. %							
0.03	0.0	0.790	0.670	0.790	0.670	0.790	0.670
	0.05	0.760	0.647	0.750	0.627	0.730	0.616
	0.1	0.750	0.638	0.740	0.618	0.720	0.607
	0.5	0.739	0.629	0.729	0.609	0.711	0.598
	1.0	0.728	0.620	0.719	0.600	0.700	0.589
0.3	0.0	0.900	0.780	0.900	0.780	0.900	0.780
	0.05	0.875	0.753	0.865	0.742	0.855	0.722
	0.1	0.863	0.744	0.850	0.733	0.845	0.713
	0.5	0.852	0.734	0.838	0.724	0.829	0.704
	1.0	0.840	0.725	0.830	0.715	0.820	0.695
3.0	0.0	1.043	0.900	1.043	0.900	1.043	0.900
	0.05	1.011	0.873	0.995	0.858	0.980	0.828
	0.1	1.000	0.864	0.984	0.849	0.965	0.819
	0.5	0.988	0.854	0.973	0.840	0.950	0.810
	1.0	0.977	0.845	0.962	0.831	0.936	0.801

Снижение концентрации хлорид-иона способствует уменьшению скорости коррозии алюминиевого сплава AlMg5.5Li2.1Zr0.15 типа дюралюмин с лантаном, церием и празеодимом, сдвигу электродных потенциалов в большей степени положительную область. Рост концентрации хлорид-иона в исследуемой среде способствует уменьшению основных электрохимических потенциалов и увеличению плотности тока и скорости коррозии сплавов (табл. 11 и 12).

Исследования электрохимического поведения алюминиевого сплава AlMg5.5Li2.1Zr0.15 типа дюралюмин с лантаном, церием и празеодимом показывает, что потенциал свободной коррозии, потенциал коррозии, питтингообразования и репассивации сплавов смещаются в положительную область с увеличением добавок РЗМ в исходном сплаве. Легирование до 1.0 мас. % лантаном, церием и празеодимом алюминиевого сплава AlMg5.5Li2.1Zr0.15 типа дюралюмин, снижает скорость коррозии.

Таблица 12 - Зависимость скорости коррозии алюминиевого сплава AlMg5.5Li2.1Zr0.15, легированного лантаном, церием и празеодимом в среде раствора NaCl

Среда NaCl	Содержание La, Ce и Pr в сплаве	Сплавы с La		Сплавы с Ce		Сплавы с Pr	
		$i_{кор.} \cdot 10^2, \text{ А/м}^2$	$K \cdot 10^3, \text{ г/м}^2 \cdot \text{ч}$	$i_{кор.} \cdot 10^2, \text{ А/м}^2$	$K \cdot 10^3, \text{ г/м}^2 \cdot \text{ч}$	$i_{кор.} \cdot 10^2, \text{ А/м}^2$	$K \cdot 10^3, \text{ г/м}^2 \cdot \text{ч}$
мас. %							
0.03	0	7.1	23.78	7.1	23.78	7.1	23.78
	0.01	6.8	22.78	6.5	21.77	6.2	20.77
	0.1	6.6	22.11	6.3	21.10	6.0	20.10
	0.5	6.4	21.44	6.1	20.43	5.8	19.43
	1.0	6.2	20.77	5.9	19.76	5.6	18.76
0.3	0	9.0	30.15	9.0	30.15	9.0	30.15
	0.01	8.7	29.14	8.4	28.14	7.1	27.13
	0.1	8.5	28.47	8.2	27.47	7.9	26.46
	0.5	8.3	27.80	8.0	26.80	7.7	25.79
	1.0	8.1	27.13	7.8	26.13	7.5	25.12
3.0	0	10.9	36.51	10.9	36.51	10.9	36.51
	0.01	10.6	35.51	10.3	34.50	10.0	33.50
	0.1	10.4	34.84	10.1	33.83	9.8	32.83
	0.5	10.2	34.17	9.9	33.16	9.6	32.16
	1.0	10.0	33.50	9.7	32.49	9.4	31.49

ВЫВОДЫ

1. В режиме «охлаждения» исследована температурная зависимость теплоёмкости алюминиевого сплава $\text{AlMg5.5Li2.1Zr0.15}$ типа дюралюмин с лантаном, церием и празеодимом. Установлено, что с ростом температуры теплоемкость сплавов растёт, а от содержания легирующего компонента уменьшается. При переходе от сплавов с лантаном, к сплавам с празеодимом теплоёмкость сплавов уменьшается.

2. Исследования термодинамических функций алюминиевого сплава $\text{AlMg5.5Li2.1Zr0.15}$ типа дюралюмин с лантаном, церием и празеодимом показали, что при переходе от сплавов с лантаном к сплавам с церием энтальпия и энтропия сплавов уменьшаются, значение энергии Гиббса имеет обратную зависимость. С ростом температуры происходит повышение энтальпии, энтропии и снижение энергии Гиббса.

3. Результаты исследования механических свойств сплава $\text{AlMg5.5Li2.1Zr0.15}$ типа дюралюмин показал, что легирование исходного сплава лантаном, церием и празеодимом приводит к уменьшению твердости и прочности сплавов.

4. Термогравиметрический анализ показал, что легирование La, Ce и Pr приводит к уменьшению энергии активации и соответственно исходный сплав наиболее устойчив к окислению при высоких температурах, т.к. характеризуется большим значением энергии активации.

5. Результат рентгенофазового анализа продуктов окисления алюминиевого сплава $\text{AlMg5.5Li2.1Zr0.15}$ типа дюралюмин с лантаном, церием и празеодимом выявил наличие следующих фаз: MgAl_2O_4 ; Li_2O ; $(\text{Mg}_{0.4}\text{Al}_{0.6})\text{Al}_{1.8}\text{O}_4$; Al_2O_3 ; $(\text{Mg}_{0.4}\text{Al}_{0.6})\text{Al}_{1.8}\text{O}_4$; ZrO_2 ; MgAl_2O_4 ; $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ (a) $(\text{Mg}_{0.75}\text{Al}_{0.25}) (\text{Al}_{0.875}\text{Mg}_{0.125})_2\text{O}_4$; $\text{Zr}_{0.952}\text{O}_2$; $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$; $(\text{Mg}_{0.64}\text{Al}_{0.36}) (\text{Al}_{0.82}\text{Mg}_{0.18})_2\text{O}_4$; Al_2MgO_4 ; $\text{La}_{1.52}\text{Al}_{1.68}\text{O}_{4.04}$; Zr_3O , $(\text{Mg}_{0.68}\text{Al}_{0.32}) (\text{Al}_{0.84}\text{Mg}_{0.16})_2\text{O}_4$; MgAl_2O_4 ; LiAl_5O_8 ; $(\text{Mg}_{0.4}\text{Al}_{0.6})\text{Al}_{1.8}\text{O}_4$; CeO_2 ; $\text{ZrO}_{1.97}$, MgAl_2O_4 ; $\text{Zr}_{0.875}\text{Mg}_{0.125}\text{O}_{1.875}$; $\text{Zr}_{0.932}\text{O}_2$; $\text{Pr}_{0.53}\text{Al}_{11}\text{O}_{16.96}$; Zr_2O_3 ; MgO ; $\text{Pr}_{0.55}\text{Al}_{10.92}\text{O}_{16.86}$; $\text{Pr}_{12}\text{O}_{22}$.

6. Результаты потенциостатических исследований анодного поведения сплава $\text{AlMg5.5Li2.1Zr0.15}$ в растворе NaCl показали, что легирование сплава редкоземельными элементами — лантаном, церием и празеодимом — в концентрациях до 1.0 мас. % приводит к повышению его анодной устойчивости на 10–15%. При этом наблюдается смещение электрохимических потенциалов в положительную область. Установлено также, что увеличение концентрации хлорид-ионов в электролите способствует ускорению коррозионных процессов, что сопровождается смещением коррозионного и стационарного потенциалов в сторону более отрицательных значений.

7. Разработанные составы $\text{AlMg5.5Li2.1Zr0.15}$ типа дюралюмин защищены малым патентом Республики Таджикистан (№ TJ 1678, от 20.02.2026г.).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ

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

1. Ганиев И.Н. Влияние лантана на теплоемкость и изменение термодинамических функций алюминиевого сплава AlMg5.5Li2.1Zr0.15 типа дюралюминий / Ганиев И.Н., Савдуллоева С.С., Худойбердизода С.У. // Неорганические материалы. 2024. Т. 60. № 7. – С. 882-888. (Scopus -Q2).

Ganiev I.N. Effect of lanthanum on the heat capacity and changes in thermodynamic functions of AlMg5.5Li2.1Zr0.15 duralumin-type aluminum alloy/ Ganiev I.N., Savdulloeva S.S., Khudoiberdizoda S.U.// Inorganic Materials. 2024. T. 60. № 11. – С. 1367-1373. (Scopus – Q2).

2. Ганиев И.Н. Температурная зависимость теплоемкости и термодинамических функций алюминиевого сплава AlMg5.5Li2.1Zr0.15 типа дюралюмин, легированного празеодимом / Ганиев И.Н., Савдуллоева С.С., Худойбердизода С.У., Джайлоев Дж.Х., Ходжаназаров Х.М. // Инженерно-физический журнал. – 2025. – Т. 98, № 3. – С. 749-756. – EDN. (Scopus -Q4).

3. Ганиев И.Н. Анодное поведение алюминиевого сплава AlMg5.5Li2.1Zr0.15 типа дюралюмин, легированного празеодимом, в среде электролита NaCl. / Ганиев И.Н., Савдуллоева С.С., Худойбердизода С.У., Джайлоев Дж.Х., Халикова Л.Р., Махмудзода М. // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. 2024. Т. 69. № 5. – С. 33-38.

4. Ганиев И.Н. Потенциостатическое исследование алюминиевого сплава AlMg5.5Li2.1Zr0.15 типа дюралюмин с лантаном в среде водного раствора NaCl / Ганиев И.Н., Савдуллоева С.С., Худойбердизода С.У., Джайлоев Дж.Х.// Практика противокоррозионной защиты. 2024. Т. 29. № 3. – С. 41-49.

5. Ганиев И.Н., Влияние добавок лантана, церия и празеодима на микроструктуру и механические свойства алюминиевого сплава AlMg5.5Li2.1Zr0.15 типа дюралюмин / Ганиев И.Н., Савдуллоева С.С., Худойбердизода С.У., Джайлоев Дж. Х., Махмудзода М., Саидзода М. М., Киреев С.Ю.// Вестник Саратовского государственного технического университета. 2026. № 1 (108). – С. 67-78.

6. Худойбердизода С. У. Электрохимические и коррозионные свойства сплава алюминия AlMg5.5Li2.1Zr0.15 (дюралюмина) с включениями лантана, церия и празеодима в 0,3%-ном растворе NaCl. / Худойбердизода С. У., Савдуллоева С. С., Ганиев И. Н., Киреев С. Ю. // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2025. – № 4(54). – С. 75-82.

7. Ганиев И.Н. Анодное поведение алюминиевого сплава AlMg5.5Li2.1Zr0.15 типа дюралюмин, легированного церием, в среде электролита NaCl. / Худойбердизода С.У., Ганиев И.Н., Савдуллоева С.С., Джайлоев Дж.Х., Саидзода М.М., Киреев С.Ю., Норова М.Т. // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2026. № 2. – С. 67-76.

8. Ганиев И.Н. Кинетика окисления алюминиевого сплава AlMg5.5Li2.1Zr0.15 типа дюралюмин с лантаном в твердом состоянии / Худойбердизода С.У., Ганиев И.Н., **Савдуллоева С.С.**, Джайлоев Дж.Х., Саидзода М.М., Киреев С.Ю., Норова М.Т. // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2026. № 2. – С. 77-89.

9. Ганиев И.Н. Влияние церия на температурную зависимость теплофизических свойств и изменение термодинамических функций алюминиевого сплава AlMg5.5Li2.1Zr0.15 типа дюралюмин / Ганиев И.Н., **Савдуллоева С.С.**, Худойбердизода С.У., Акбаров Ш.С., Сулаймони Ф.С., Ибрахимов П.Р. // Вестник Бохтарского Государственного Университета имени Носира Хусрава. Серия естественных наук. 2025. – 2/3 (138) – С. 44-52.

10. Ганиев И.Н. Влияние церия на кинетику окисления алюминиевого сплава AlMg5.5Li2.1Zr0.15 типа дюралюмин / Ходжаназаров Х.М., Ганиев И.Н., **Савдуллоева С.С.** // Вестник Бохтарского Государственного Университета имени Носира Хусрава. Серия естественных наук. Часть 2. 2025. – № 2/4 (129). – С. 111-118.

11. **Савдуллоева С. С.** Температурная зависимость теплоемкости и изменений термодинамических функций алюминиевого сплава AlMg5.5Li2.1Zr0.15 типа дюралюмин с лантаном / Савдуллоева С.С., Ганиев И. Н., Худойбердизода С. У., Иброхимов П.Р., Саидзода М.М., Идиев И. Ш., Холикова Л.Р.// Вестник Бохтарского государственного университета имени Носира Хусрава. Серия естественных наук. – 2025. – № 2-4(141). – С. 77-85.

Изобретения:

12. Малый патент Республики Таджикистан № TJ 1678. Алюминиевый сплав типа дюралюмин / И.Н. Ганиев, А.М. Сафаров, С.У. Худойбердизода, С.С. Савдуллоева, Дж.Х. Джайлоев, А. Дж. Амиров, Ш.С. Акбаров (№ 2502144; заявл. 18.07.2025, опубл. 20.02.2026г. (Акт опытно-промышленного испытания «Алюминиевый сплав типа дюралюмин» от 22.04.2026г.).

Статьи, опубликованные в материалах международных и республиканских конференций:

13. **Савдуллоева С.С.** Потенциал свободной коррозии алюминиевого сплава AlMg5.5Li2.1Zr0.15 с лантаном, в среде электролита 0,3%-ного NaCl / С.С. Савдуллоева, И. Н. Ганиев, С.У. Худойбердизода, Ф.Р. Саидова, Ш.С. Акбаров // Мат. Межд. науч.-практ. Конф. «Развитие математических, точных и естественных наук в современном времени: проблемы и перспективы» посвящённая объявлению «2020-2040 годы, двадцатилетие, изучения и развития естественных, точных и математических наук, в сфере науки и образования».2023. – С.398-402.

14. **Савдуллоева С.С.** Расчёт коэффициента теплоотдачи алюминиевого сплава AlMg5.5Li2.1Zr0.15 типа дюралюмин, легированного церием / С.С. Савдуллоева, И. Н. Ганиев, Ф.Р. Саидова // Межд. Науч. Конф. на тему «Развитие энергетической отрасли в Республике Таджикистан» 2023. – С.101-102.

15. Ганиев И.Н. Потенциал свободной коррозии алюминиевого сплава AlMg5.5Li2.1Zr0.15 типа дюралюмин с церием в среде электролита 0,3% NaCl / И. Н. Ганиев, **С.С. Савдуллоева**, С.У. Худойбердизода, Дж.Х. Джайлоев // VI межд. науч. конф. «Вопросы физической и координационной химии», посвящённой «Двадцатилетию изучения и развитие

естественных, точных и математических наук в сфере науки и образования» (2020-2040 годы), 15-16 мая 2024г. – С.349-353.

16. Ганиев И.Н. Расчёт коэффициента теплоотдачи алюминиевого сплава $AlMg5.5Li2.1Zr0.15$ типа дюралюминия, легированного лантаном / И. Н. Ганиев, С.С. Савдуллоева, С.У. Худойбердизода, Х.М. Ходжаназаров // Межд. научно-практ. конф. на тему «Развитие математических, точных и естественных наук в связи с образованием и производства», посвященная объявлению 2020-2040 годы “Двадцатилетием изучения и развития естественных, точных и математических наук в сфере науки и образования”. 30 апреля 2024 года – С.126-129.

17. Ганиев И.Н. Влияния празеодима на коэффициент теплоотдачи алюминиевого сплава $AlMg5.5Li2.1Zr0.15$ типа дюралюмин / И. Н. Ганиев, С.С. Савдуллоева, Х.М. Ходжаназаров, М.Б. Джумъева // Межд. научно-практ. конф. на тему “Знание изучения естественных, точных и математических наук в развитии медицинской технологии” посвященной “двадцатилетию изучения и развития естественных точных и математических наук в сфере образования”. 18-марта 2024. С. 241-245.

18. Ганиев И.Н. Влияние лантана на анодное поведение алюминиевого сплава $AlMg5.5Li2.1Zr0.15$ типа дюралюмин в среде водного раствора 0.03%-ного $NaCl$ / И. Н. Ганиев, С.С. Савдуллоева, С.У. Худойбердизода, Дж.Х. Джайлоев// Межд. научно-практ. конф. посвященной «Двадцатилетию изучения и развития естественных, точных и математических наук в сфере науки и образования» на тему «Зелёная энергетика, состояние и перспектива развития в республике Таджикистан» (17.10.2024). – С. 59-62.

19. Ганиев И.Н., Влияние церия на потенциал свободной коррозии алюминиевого сплава $AlMg5.5Li2.1Zr0.15$ типа дюралюмин в среде электролита 0,03 %-ного $NaCl$ / И. Н. Ганиев, С.С. Савдуллоева, С.У. Худойбердизода // Межд. научно-практ. конф. под названием «Актуальные проблемы развития текстильной промышленности Республики Таджикистан в период ускоренной индустриализации» 12 декабря 2024 г. – С.32-35.

20. Худойбердизода С.У. Исследование воздействия празеодима на тепловые параметры алюминиевого сплава $AlMg5.5Li2.1Zr0.15$ при понижении температуры/ С.У. Худойбердизода, И. Н. Ганиев, С.С. Савдуллоева, Дж.Х. Джайлоев, М.М. Саидзода, С.Ю. Киреев // Современные проблемы физико-математических наук. Материалы XI Всероссийской научно-практической конференции. Орёл, 2026. – С. 374-379

21. Савдуллоева С. С. Кинетика окисления алюминиевого сплава $AlMg5.5Li2.1Zr0.15$ с церием в твёрдом состоянии / С.С. Савдуллоева, И. Н. Ганиев, Ш. С. Акбаров, С.У. Худойбердизода, Дж.Х. Джайлоев //Аналитическая химия и её значение в развитии естественных и технических наук: межд. научно-практ. конф. 23–21 октября 2025 года. – Душанбе: Таджикский национальный университет, 2025. – С. 61-66.

22. Савдуллоева С.С. Влияние лантана на потенциал свободной коррозии алюминиевого сплава $AlMg5.5Li2.1Zr0.15$ в среде электролита $NaCl$ / С.С. Савдуллоева, И. Н. Ганиев, С.У. Худойбердизода, Ф.Р. Саидова, Ш.С. Акбаров // Мат. Респ. науч-практ. Конф. на тему: «Роль и использование достижений естественных, точных и математических наук в производстве», посвящённой дню науки 14 апреля. 2023. – С. 25-28.

23. Ганиев И.Н. Потенциал свободной коррозии алюминиевого сплава $AlMg5.5Li2.1Zr0.15$ типа дюралюмин с празеодимом в среде электролита 3,0% $NaCl$ / И. Н. Ганиев, С.С. Савдуллоева, С.У. Худойбердизода // Мат. Респ. науч-практ. конф XIX Нумановские чтения «Развитие фундаментальной и прикладной химии и её вклад в индустриализацию страны», г. Душанбе. 16 октября 2024. – С. 351-354.

Сдано в печать _____ 2026 г.
Подписано в печать _____ 2026 г.
Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная.
Печать офсетная. Тираж 100 экз.

Отпечатано в типографии
ООО «Сармад-Компания»
г. Душанбе, ул. Лахути 6, 1 проезд