## НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК ТАДЖИКИСТАНА ИНСТИТУТ ХИМИИ им. В.И. НИКИТИНА

УДК 669.77:621

На правах рукописи

Ina Jane

ЯКУБОВ Умарали Шералиевич

## ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АЖ5К10 С КАЛЬЦИЕМ, СТРОНЦИЕМ И БАРИЕМ

6D071000 – Материаловедение и технология новых материалов

### **ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени доктора PhD технических наук

Научный руководитель:

доктор химических наук, профессор, академик Национальной академии наук Таджикистана Ганиев Изатулло Наврузович

Душанбе - 2020

### ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ	5
ГЛАВА 1. СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СПЛАВОВ СИСТЕМ	
АЛЮМИНИЯ С ЖЕЛЕЗОМ, КРЕМНИЕМ И	
ЩЕЛОЧНОЗЕМЕЛЬНЫМИ МЕТАЛЛАМИ (обзор литературы)	10
1.1. Теплоемкость алюминия, кремния, железа и элементы подгруппы	
кальция	10
1.2. Особенности окисления сплавов систем Al-Fe, Al-Si и Al-Ca (Sr, Ba)	17
1.3. Электрохимическое поведение сплавов системы Al-Fe, Al-Si и Al-Ca	
(Sr, Ba)	21
1.4. Характеристика исходного алюминиевого сплава АЖ5К10	26
1.5. Выводы по обзору литературы и постановка задачи	30
ГЛАВА 2. ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ТЕПЛОЕМКОСТИ	
И ИЗМЕНЕНИЙ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ	
АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АЖ5К10, МОДИФИЦИРОВАННОГО	
КАЛЬЦИЕМ, СТРОНЦИЕМ И БАРИЕМ	32
2.1. Теория метода и схема установки для измерения теплоёмкости	
твердых тел	32
2.2. Влияние кальция на температурную зависимость удельной	
теплоемкости и изменений термодинамических функций	
алюминиевого сплава АЖ5К10	37
2.3. Влияние стронция на температурную зависимость удельной	
теплоемкости и изменений термодинамических функций сплава АЖ5К10	43
2.4. Теплоемкость и изменение термодинамических функций сплава	
АЖ5К10, модифицированного барием	48
2.5. Заключение к главе 2	54

ГЛАВА 3. ИЗУЧЕНИЕ КИНЕТИКИ ПРОЦЕССА ОКИСЛЕНИЯ	56
АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АЖ5К10 С КАЛЬЦИЕМ,	
СТРОНЦИЕМ И БАРИЕМ, В ТВЕРДОМ СОСТОЯНИИ	
3.1. Методика изучения кинетики окисления сплавов	56
3.2. Кинетика окисления алюминиевого сплава АЖ5К10,	
модифицированного кальцием, в твердом состоянии	58
3.3. Влияние стронция на кинетику окисления алюминиевого сплава	
АЖ5К10, в твердом состоянии	67
3.4. Высокотемпературное окисление алюминиевого сплава АЖ5К10,	
модифицированного барием, в твердом состоянии	75
3.5. Заключение к главе 3	83
ГЛАВА 4. ПОТЕНЦИОДИНАМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ	
АНОДНОГО ПОВЕДЕНИЯ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АЖ5К10,	
МОДИФИЦИРОВАННОГО КАЛЬЦИЕМ, СТРОНЦИЕМ И	
БАРИЕМ, В СРЕДЕ ЭЛЕКТРОЛИТА NaCl	84
4.1. Материалы и методики исследования анодных свойств алюминиевого	
сплава АЖ5К10 с кальцием, стронцием и барием	84
4.2. Влияние добавок кальция на коррозионно-электрохимическое	
поведение алюминиевого сплава АЖ5К10, в среде электролита NaCl	85
4.3. Анодное поведение сплава АЖ5К10, модифицированного	
стронцием, в среде электролита NaCl	91
4.4. Электрохимическая коррозия сплава АЖ5К10, модифицированного	
барием, в среде электролита NaCl	97
4.5. Заключение к главе 4	102
выводы	110
ЛИТЕРАТУРА	112
ПРИЛОЖЕНИЕ	129

#### введение

*Актуальность работы.* В современных материалах должны сочетаться высокие свойства и качества для обеспечения необходимого ресурса и надёжности работы изделий авиационно-космической техники, машиностроения, атомной энергетики, радиотехники, электроники и т.д. В связи с этим особое значение приобретает производство и использование алюминия и его сплавов, обладающих высокой коррозионной стойкостью, механической прочностью и других специфических свойств [1, 2].

Особый интерес для современного машиностроения представляют высокопрочные литейные алюминиевые сплавы со свойствами идентичных деформируемых сплавов. Основным фактором, определяющим механические и технологические свойства литейного сплава, является состав, в том числе и содержащий вредных примесей и газов, зависящие от технологии плавки, а также состава исходных материалов и флюсов [3, 4].

Отсюда, разработка прецизионных сплавов на основе такого металла путём его легирования третьим элементом является актуальной задачей. Подобный подход позволяет превратить некондиционный металл в нужный и полезный продукт для техники. Иногда, для блокировки отрицательного влияния железа, сплавы легируют марганцем в количествах 0,5-1,0%. В фазе FeAl<sub>3</sub> до 1/10 часть атомов железа может замещаться атомами марганца. В результате образуется новая фаза Al<sub>3</sub>FeMn. Кристаллы указанной фазы отличаются более компонентной формой в отличие от игольчатой структуры фазы FeAl<sub>3</sub> [5-7].

Для изменения формы кристаллов интерметаллида в эвтектике ( $\alpha$ -Al+FeAl<sub>3</sub>), в качестве модифицирующего элемента нами были выбраны металлические кальций, стронций и барий, как поверхностно активные компоненты тройного сплава. Подобный подход позволяет разработать новые композиции сплавов на основе алюминия. Выбор исходного сплава Al+5маc.%Fe+10mac.%Si (AЖ5K10) объясняется тем, что состав данного сплава состоит из эвтектик ( $\alpha$ -Al+FeAl<sub>3</sub>) и ( $\alpha$ -Al+Si+FeSiAl<sub>5</sub>), которые примыкают к алюминиевому углу системы Al-Fe-Si и плавится при температуре 670-727 <sup>0</sup>C.

#### ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Цель настоящей работы заключается в исследовании температурной зависимости теплоёмкости и изменений термодинамических функций (энтальпии, энтропии, энергии Гиббса), кинетике высокотемпературного окисления и коррозионно-электрохимического поведения сплава АЖ5К10, модифицированного кальцием, стронцием и барием, предназначенного в качестве конструкционного материала для нужд отдельных отраслей промышленности.

#### Задачи исследования:

- изучена температурная зависимость теплоёмкости и изменений термодинамических функций алюминиевого сплава АЖ5К10, модифицированного кальцием, стронцием и барием;

 изучена кинетика окисления алюминиевого сплава АЖ5К10 с указанными элементами в твердом состоянии и определен механизм процесса их окисления;

 изучено влияние добавок кальция, стронция и бария на анодное поведение и коррозионную стойкость алюминиевого сплава АЖ5К10 в нейтральной среде электролита NaCl;

 оптимизированы составы четырёхкомпонентных сплавов на основе установления их структуры, теплофизических, физико-химических свойств и определения возможных областей их использования.

#### Методы исследования и использованная аппаратура:

- метод исследования теплоёмкости сплавов в режиме «охлаждения» с использованием автоматической регистрации температуры образца от времени охлаждения;

- термогравиметрический метод исследования кинетики окисления металлов и сплавов в твёрдом состоянии;

- электрохимический метод исследования анодных свойств сплавов в потенциостатическом режиме (прибор ПИ 50-1.1);

- математическая обработка результатов проводилась с использованием стандартного пакета приложения и программы Microsoft Excel и Sigma Plot.

#### Степень достоверности и апробация результатов

Результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на следующих научных конференциях, симпозиумах и форумах:

Международных: XIV Международной научной конференции студентов и молодых ученых «GYLYM JÁNE BILIM - 2019». Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилёва, (г. Астана, 2019); XXI Международной научно-практической конференции «Металлургия: Сибирский технологии, инновации, качество». государственный индустриальный университет (г. Новокузнецк, 2019); Международной научно-практической конференции студентов, магистрантов, соискателей и учёных «Мухандис-2019». Таджикский технический университет им. М.С. Осими (г. Душанбе, 2019); IV Международной научной конференции «Вопросы физической и координационной химии», посвященной памяти профессоров Якубова X.M. И Юсуфова 3.H. Таджикский Д.Х.Н., национальный университет (г. Душанбе, 2019); VII Международной научнопрактической конференции «ЛУЧШАЯ НАУЧНАЯ СТАТЬЯ 2017» (г. Пенза, 2017); XXI Международной научно-практической конференции «Исследование различных направлений современной науки» (г. Москва, 2017); Международной конференции «Перспективы развития физической науки», посвященной памяти (80-летию) профессора Хакимова Ф.Х. Таджикский национальный университет (г. Душанбе, 2017).

Республиканских: Республиканской научно-практической конференции «Актуальные вопросы дифференциальных уравнений, математического анализа, алгебры и теории чисел и их приложения». Российско-Таджикский (Славянский) университет (г. Душанбе, 2019); Республиканской научно-практической конференции (с международном участием) «Применение инновационных технологий в преподавании естественных дисциплин в СОШ и ВУЗах» и «Инновация в преподавании

6

естественных наук», посвященной 150-летию периодической таблицы химических элементов Д.И. Менделеева. Таджикский национальный университет (г. Душанбе, 2019); Республиканкой научно-практической конференции «Наука и техника для устойчивого развития» (г. Душанбе, 2018); Республиканской научно-практической конференции «Стратегия и аспекты развития горной промышлености Республики Таджикистан». Филиал НИТУ «МИСиС» в г. Душанбе (г. Душанбе, 2017); Научнопрактическом семинаре «Наука-производству», посвященной 100- летию НИТУ «МИСиС» (г. Турсунзаде, 2017).

#### Научная новизна исследований:

установлены закономерности изменения теплоемкости И термодинамических функций (энтальпии, энтропии и энергии Гиббса) сплава АЖ5К10, модифицированного кальцием, стронцием и барием в зависимости от температуры и количества модифицирующего компонента. Показано, что с ростом температуры теплоемкость, энтальпия и энтропия сплава АЖ5К10, модифицированного кальцием, стронцием и барием, увеличиваются, а Гиббса значение энергия уменьшается. С увеличением доли модифицирующего компонента в сплаве АЖ5К10 энтальпия и энтропия уменьшаются, а энергия Гиббса увеличивается;

- показано, что с ростом температуры скорость окисления сплава АЖ5К10, модифицированного кальцием, стронцием и барием, в твердом состоянии увеличивается. Константа скорости окисления имеет порядок 10<sup>-4</sup>, кг<sup>·м<sup>-2</sup>·c<sup>-1</sup></sup>. Установлено, что окисление сплава АЖ5К10, модифицированного кальцием, стронцием и барием описывается гиперболическим уравнением;

- потенциостатическим методом в потенциодинамическом режиме при скорости развертки потенциала 2 мВ/с установлено, что добавки модифицирующих компонентов до 1,0 мас.% увеличивают коррозионную стойкость исходного сплава АЖ5К10 на 50-80%. При этом отмечается сдвиг электрохимических потенциалов в положительную область значений. При переходе от сплавов с кальцием к сплавам со стронцием наблюдается рост

7

скорости коррозии, далее к сплавам с барием его уменьшение (для сплавов с 1,0 мас.% добавки).

*Теоретическая значимость работы.* В диссертации изложены теоретические аспекты исследований: доказательства влияния структуры, температурная зависимость теплоемкости и изменение термодинамических функций, закономерности изменений коррозионно-электрохимические, кинетические и энергетические характеристики алюминиевого сплава АЖ5К10 с кальцием, стронцием и барием; коррозионной среды и концентрации модифицирующих добавок на коррозионной стойкости и окисляемости алюминиевого сплава АЖ5К10.

Практическая значимость работы заключается в разработке состава новых сплавов и металлургического способа улучшения коррозионной стойкости алюминиевого сплава АЖ5К10, модифицированием кальцием, стронцием, барием, и защите их малыми патентами Республики Таджикистан.

#### На защиту выносятся:

результаты исследования температурных зависимостей теплоемкости
 и изменений термодинамических функций алюминиевого сплава АЖ5К10,
 модифицированного кальцием, стронцием и барием;

 кинетические и энергетические параметры процесса окисления алюминиевого сплава АЖ5К10, модифицированного кальцием, стронцием и барием, а также механизм окисления сплавов. Результаты идентификации продуктов окисления сплавов и установления их роли в формировании механизма окисления;

- зависимости анодных характеристик и скорости коррозии алюминиевого сплава АЖ5К10, модифицированного кальцием, стронцием и барием, от концентрации модифицирующего компонента в среде электролита NaCl;

- оптимальные составы сплавов, отличающихся наименьшей окисляемостью и повышенной коррозионной стойкостью, представляющие

интерес в качестве анодного материала для изготовления протекторов, при защите от коррозии стальных конструкций и сооружений.

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

*Публикации:* По теме диссертации опубликованы 6 статей в журналах рекомендованных ВАК при Президенте Республики Таджикистан и 13 статей в материалах международных и республиканских конференций, а также получено 2 малых патента Республики Таджикистан.

*Структура и объем диссертации.* Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, выводов, списка литературы и приложений. Диссертация изложена на 132 страницах компьютерного набора, включая 32 таблицы, 66 рисунков и 106 библиографических наименований.

# ГЛАВА 1. СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СПЛАВОВ СИСТЕМ АЛЮМИНИЯ С ЖЕЛЕЗОМ, КРЕМНИЕМ И ЩЕЛОЧНОЗЕМЕЛЬНЫМИ МЕТАЛЛАМИ (обзор литературы) 1.1. Теплоемкость алюминия, кремния, железа и элементы подгруппы кальция

Алюминий. Как известно [8], алюминий плавится при 933,6 К. В работе [9] сообщается, что при 298К алюминий имеет ГЦК структуру кристаллической решетки с периодом решетки α-0,405 нм.



Рисунок 1.1 – Температурная зависимость удельной теплоемкости (C<sub>p</sub>) алюминия: 1 - [10], 2 - [8], 3 - данные [11] от температуры Дебая ( $\theta$ D)

Авторами [8, 10] изучена теплоёмкость алюминия в диапазоне температур 50-1400 К, результаты которых графически изображены на рисунке 1.1 и обобщены в таблице 1.1. Показанные данные [9] относятся к алюминию степени чистотой 99.999%, а погрешность измерений указана согласно температуре исследования, то есть ниже 400 К она составляет 1%, при температурах 400-933.6 К равняется 2%, а при повышении температуры металл переходит в жидкое состояние, где погрешность измерения далее достигает 3%.

тν	d,	C <sub>p</sub> ,	$\alpha \cdot 10^6$ ,	λ,	$\rho \cdot 10^8$ ,	ТЛ
Ι, Κ	г/см <sup>3</sup>	Дж/(кг∙К)	м <sup>2</sup> /с	Вт/(м∙К)	Ом · м	$L/L_0$
50	-	483,6	358	1350	0,0478	-
100	2.725	800.2	228	300.4	0.442	-
200	2.715	903.7	109	236.8	1.587	0.77
300	2.697	951.3	93.8	235.9	2.733	0.88
400	2.6	991.8	93.6	238.2	3.866	0.94
500	2.665	1036.7	88.8	234.7	4.995	0.96
600	2.652	1090.2	83.7	230.1	6.130	0.95
700	2.626	1153.8	78.4	224.4	7.350	0.96
800	2.560	1228.2	73.6	220.4	8.700	0.97
900	2.550	1153.8	69.2	217.6	10.18	0.99
933,61 <sub>s</sub>	2.368	1228.2	68.0	217.7	10.74	1.06
933,61 <sub>1</sub>	2.350	1255.8	35.2	98.1	-24.77	1.06
1000	2.290	1176.7	36.4	100.6	-28.95	1.04
1100	-	1176.7	39.5	106.4	-31.77	-
1200	-	1176.7	42.4	-	-34.40	-
1400	-	1176.7	44.8	-	-36.93	-

Таблица 1.1 – Теплофизические свойства Al [8, 12-15]

Железо. Железо, имея ОЦК структуру решетки ниже 1183К, описывается периодом решетки, равным  $\alpha$ =0,287 нм. Ниже (1042±0,5 К) точки Кюри [14, 16] показывает модификацию  $\alpha$ -Fe, а модификация  $\beta$ -Fe образуется в парамагнитной области до 1183 К; далее  $\gamma$ -Fe образуется при

ГЦК с периодом α=0,365 нм, Т-1189 К. Переход γ-δ происходит при Т-1667 К; δ-Fe имеет вновь ГЦК структуру решетки с α=0,293 нм, Тпл.=1811 К [17]. Теплофизические характеристики железа обобщены в таблице 1.2 [17, 18].

тк	$d \cdot r/cm^3$	<sub>3</sub> С <sub>р</sub> , Дж/(кг·К)		$\alpha \cdot 10^6$ ,	λ,	$\rho \cdot 10^8$ ,	I/I
1, K	u i/cm	[10]	[17]	м <sup>2</sup> /с	Вт(м·К)	Ом∙м	L/ L <sub>0</sub>
100	-	-	215.1	-	-	-	-
200	-	-	384.0	30.8	-	4.1	-
300	7.86	446	449.0	22.6	78.8	9.2	1.10
400	7.83	488	490.1	17.1	68.3	15.4	1.15
500	7.80	530	530.6	14.8	60.7	23.2	1.21
600	7.76	571	572.1	11.4	54.1	32.5	1.24
700	7.72	617	619.8	10.1	47.7	44.7	1.26
800	7.69	676	678.1	8.17	42.6	57.6	1.26
900	7.65	669	772.7	5.30	36.2	73.0	1.23
1000	7.61	1033	974.1	3.06	31.0	90.3	1.18
1042	7.60	1235	1408.0	2.70	24.4	101.2	1.02
1100	7.58	828	793.1	4.79	30.1	105.4	1.18
1183 <sub>α</sub>	-	741	715.1	5.39	29.0	110.0	1.11
1183 <sub>β</sub>	-	606	604.7	6.09	28.0	108.0	1.08
1200	-	607	606.1	6.19	28.0	110.8	1.09
1400	-	637	639.1	6.58	30.5	116.2	1.06
1600	-	666	672.7	6.89	33.1	120	1.05
1800	-	759	798.4	6.39	34.1	-	-
1810 <sub>s</sub>	-	761	804.7	6.39	34.1	129	1.01
1810 <sub>1</sub>	7.03	824	833.8	6.7	38.1	132	1.2
2000	-	824	834.0	-	-	137	-

Таблица 1.2 – Теплофизические свойства железа [10, 14, 16-18]

*Кремний*. При более быстром проведении эксперимента регистрируется монотонная зависимость теплоемкость кремния от температуры, (рисунок 1.2, кривая 2) [19-22], которая полностью соответствует температурному поведению теплоёмкости Si, рекомендованной в [43] для температур выше 298К (рисунок 1.2, кривая 5).



Рисунок 1.2 – Теплоемкость монокристаллического кремния в интервале температур 400 – 800К: 1,2 - теплоемкость монокристаллического кремния при скоростях нагрева 4К/мин - (7) и 16К/мин (2); 3 - теплоемкость кремния согласно рекомендациям [20].

Авторами [22] получены новые данные в результате измерения теплоёмкости кремния на приборе микрокалориметра ДСМ-2М (скорость сканирования равная 16 К/мин), которые согласуются с данными, ранее полученными другими авторами [21-23], что подтверждает достоверность полученных результатов [23] (рисунок 1.3). Результаты измерения теплоёмкости монокристаллического Si, в котором тепловой эффект регистрировался в режиме скорости (4 К/мин) сканирования, что в итоге связано с фазовым переходом II рода (таблица 1.3).



**Рисунок 1.3** – Сопоставление данных по температурной зависимости теплоемкости кремния, полученных в работе [23], с данными [20]: 1 - [21-23], 2 - [22], 3 - [20], 4 - данные авторов при скорости нагрева 4К/мин.

**Таблица 1.3** – Значения теплоемкости монокристаллического кремния при скорости нагрева 4 К/мин, полученные авторами [20]

Т, К	С <sub>р</sub> , Дж/моль•К	Т, К	С₀, Дж/моль•К
350	21.33	610	48.95
400	22.30	620	43.93
450	22.90	630	39.33
500	23.50	640	37.24
520	24.27	650	33.89
540	25.10	660	33.47
550	25.94	670	31.80
560	161.92	680	30.96
570	75.31	690	29.71
580	64.43	700	29.29
590	58.58	710	24.24
600	53.56	-	-

*Кальций*. Металлический кальций обладает двумя модификациями: г.ц.к. (α-Ca) при T=299К и (β-Ca) при T=776К. Его кристаллографические модификации обладают переходом температуры, равной 716 К, по данным работы [14], а согласно работам [24] и [16] подтверждаются температуры 737 и 740К. Температурная зависимость теплофизических характеристик кальция показана в таблице 1.4.

тк	d,	С <sub>р</sub> , Дж	к/(кг•К)	$\alpha$ ·10 <sup>6</sup> ,	λ,	ρ·10 <sup>8</sup> ,
1, K	г/см <sup>3</sup>	[27]	[8]	м <sup>2</sup> /с	Вт(м·К)	Ом м
50	-	-	-	-	-	0.231
100	-	500.1	-	-	-	0.867
200	1.551	612.7	-	229	-	2.13
300	1.539	646.4	646.4	198	197	3.44
400	1.527	669.4	668.4	177	181	4.72
500	1.516	610.7	710.7	165	175	6.01
600	1.504	757.0	757.0	151	172	7.34
700	1.548	807.5	808.4	139	172	8.69
715 α	1.546	816.7	816.7	141	178	8.91
715 <sub>β</sub>	1.51	785.0	785.0	137	164	-
800	-	843.7	858.5	124	159	10.1
900	-	915.8	927.1	94.1	130	10.4
1000	-	990.6	983.4	80.0	120	12.7
1100	-	1066.8	1072.7	-	-	14.2
1114 <sub>s</sub>	-	1077.4	1136.7	-	-	14.4
1114 <sub>t</sub>	-	773.4	814.8	-	-	32.0
1200	-	773.4	807.4	-	-	32.0
1400	-	773.4	792.2	-	-	-
1600	-	773.4	778.6	-	-	-

Таблица 1.4 – Теплофизические свойства кальция [24-26, 13-15]

Стронций. При температуре ниже 488,1 К и нормальном давлении стронций по данным [24] имеет г.ц.к. структуру решетки, но в других справочниках [14, 16, 28] указывается, что ГЦК переходит в ГПУ модификацию, хотя в работе [24] достоверно подтверждено, что ГЦК имеет стабильность до 830К, а далее при 887.1К переходит в ОЦК модификацию, а остальные фазовые превращения от температуры написаны в обзоре [8]. В таблице 1.5 приведена температурная зависимость теплоемкости и других физических свойств стронция по данным [24].

		С <sub>р</sub> , Дж	/(кг•К)		λ, Βτ(1	м•К)	
Т, К	d, г/см <sup>3</sup>	[27]	[8]	·10 <sup>6</sup> , м <sup>2</sup> /с	[29]	[30]	р · 10 <sup>8</sup> , Ом∙м
50	-	-	-	-	-	-	2.17
100	-	267.0	-	-	-	-	4.56
200	-	292.5	-	-	-	-	9.03
300	2.62	305.7	304.8	44.2	36.2	47.6	12.50
400	2.60	312.6	312.4	38.0	31.8	-	16.80
500	2.58	326.1	326.0	32.5	26.6	-	22.10
600	2.57	342.8	342.8	30.0	26.4	-	26.60
700	2.56	359.7	358.6	29.0	26.7	-	30.20
800	2.54	376.2	376.1	28.6	27.5	-	35.50
827 α	2.53	380.2	380.2	28.4	27.6	-	36.00
827 <sub>β</sub>	-	412.0	436.2	-	-	-	47.70
900	-	424.8	466.5	22.7	-	-	-
1000	-	440.3	510.7	22.3	-	-	62.10

Таблица 1.5 – Теплофизические свойства стронция [8, 24, 27, 29, 30]

1040 <sub>s</sub>	-	447.1	527.6	-	-	-	64.70
1200	-	410.8	452.1	-	-	-	-
1400	-	410.8	435.2	-	-	-	-
1600	-	410.8	420.4	-	-	-	-

*Барий*. Согласно работе [24] барий обладает ОЦК структуру, но в работе [31] авторами в интервале 950-1004 К показано значение 995±3 К, по которому намечается тенденция к ее росту. В приведенной работе принято значение Тпл.=1001 К [27, 30]. В таблице 1.6 обобщены физические свойства бария в зависимости от температуры по данным справочника [24- 31].

тк	d,	С <sub>р</sub> , Дз	$(K K K K)  \alpha \cdot 10^6,$		λ, Вт(м·К)		$p \cdot 10^8$ ,
1,1	г/см <sup>3</sup>	[27]	[14]	м <sup>2</sup> /с	[30]	Оценки	Ом м
50	-	-	-	-	-	-	3.87
100	-	176.8	-	-	28.0	26.6	8.84
200	3.60	191.0	-	30.4	24.4	24.1	20.1
300	3.58	205.1	204.3	26.4	20.1	20.3	34.2
400	3.56	258.6	237.3	-	-	18.0	50.4
500	3.54	284.4	260.5	-	-	16.8	72.3
600	3.52	298.7	280.4	-	-	14.8	98.1
700	3.49	309.0	297.4	-	-	12.2	129
800	3.48	317.5	314.8	-	-	11.5	167
900	3.46	322.6	330.8	-	-	9.1	215
1001 <sub>s</sub>	3.43	326.7	346.2	-	-	8.7	275
1001 <sub>t</sub>	-	296.0	300.9	-	-	7.8	306
1200	-	290.6	293.3	-	-	-	-
1400	-	283.4	284.6	-	-	-	-
1600	-	277.2	277.4	-	-	-	-

**Таблица 1.6** – Теплофизические свойства бария [14, 24, 27, 30, 31]

#### 1.2. Особенности окисления сплавов систем

#### Al-Fe, Al-Si и Al-Ca (Sr, Ba)

Кинетические окисления сплавов системы Al-Fe. Для сплавов алюминия с железом показана обратная зависимость касательно энергии активации, то есть величина энергии активации для металлического железа приобретает значение 13,1 ккал/моль, а для алюминия она составляет 18 ккал/моль, но при синтезированных двойных Al-Fe сплавах эта величина находится в диапазоне 100-135 ккал/моль [32-34].

Кинетические окисления сплавов системы Al-Si. Авторами [35-37] исследованы кинетики окисления Al-Si сплавов в жидком состоянии, результаты кинетические и энергетические параметры процесса окисления жидких сплавов алюминия с кремнием представлены в таблице 1.7 [37].

Таблица	1.7	—	Кинетические	И	энергетические	параметры	процесса
окисления	жид	ких	сплавов Al-Si [3	35-3	37]		

Содерх мас	кание, 2.%	Температура	Истинная скорость окисления,	Кажущаяся энергия активация,
Al	Si		$K \cdot 10^{-4}$ , кг · м <sup>-2</sup> · c <sup>-1</sup>	кДж/моль
		973	2.77	
100	0	1023	4.66	74.40
		1073	6.60	
		973	3.36	
98	2	1023	5.00	65.32
		1073	7.50	
	4	973	3.56	64.90
96		1023	5.83	04.70
		1073	9.16	
92	8	923	3.70	61 13
	0	973	6.60	01.15

		1073	14.10	
		923	5.00	
90	10	973	7.22	56.94
		1073	14.16	
	1		При	ложение таблица 1.7
		873	8.30	
87.4	12.6	923	12.22	51.08
		973	14.17	
		973	10.55	
84	16	1023	12.55	68.67
		1073	16.60	
		1223	8.30	
60	40	1273	11.16	103.00
		1323	16.66	
		1373	8.33	
50	50	1423	12.50	136.91
		1473	22.22	
		1423	9.43	
40	60	1473	13.33	139.01
		1523	20.00	
		1573	12.50	150.11
20	80	1623	16.66	159.11
		1673	25.00	
	1.0.0	1703	6.60	
0	100	1853	18.80	175.90
1	1		1	

Кинетика окисления сплавов системы Al-Ca (Sr, Ba). Авторами [38, 40] изучено окисление сплавов алюминия с элементами подгруппы кальция в жидком состоянии и в неизотермических условиях температуры.

Изучение порошковых сплавов алюминия с кальцием до 773 К показывает незначительные значения константы скорости окисления. С ростом содержания стронция до 45 ат.% и повышения температуры плавления сплавов наблюдается понижение скорости окисления (таблица 1.8).

**Таблица 1.8** – Кинетические параметры процесса окисления порошковых сплавов системы алюминий – ЩЗМ [38-40]

Состав си	плавов,		Кажущаяся			
ат.9	%	873	973	1073	1173	энергия
ЩЗМ	Al	Средняя ск	орость оки	сления, К∙10	$0^{-12}, \kappa \Gamma^2/c.$	активации,
		К <sub>1</sub>	К <sub>2</sub>	К <sub>3</sub>	К <sub>4</sub>	кДж/моль
	1	Систе	ма алюмині	ий – кальци	Й	I
7.1 Ca	9.4	0.133	1.335	1.807	3.774	84.35
14.1 Ca	87	0.152	0.845	2.577	4.641	106.88
20.1 Ca	81	0.062	0.382	1.962	3.771	138.52
33.4 Ca	66.8	0.101	0.360	0.981	3.771	144.53
73.1 Ca	28	6.793	7.562	13.01	13.51	66.48
86.1 Ca	15	1.802	3.812	11.665	10.46	47.47
	1	Систем	иа алюмини	й – стронци	ій	I
3.1 Sr	96.7	0.078	0.546	2.081	3.681	118.72
7.2 Sr	92.8	0.078	0.482	2.646	3.121	124.66
11.7 Sr	80.3	0.078	0.281	0.951	1.735	127.85
20.1 Sr	80.1	0.038	0.244	0.876	1.774	166.22
33.4 Sr	66.8	0.071	0.291	0.987	1.812	138.06
60.1 Sr	40.1	0.036	0.219	0.800	2.892	127.85
77.1 Sr	23.1	0.331	5.251	10.08	14.03	41.54
		Сист	ема алюмин	ний – барий		
2.2 Ba	97.7	0.070	0.290	0.980	1.638	116.34
4.7 Ba	95.3	0.098	0.800	2.420	5.270	127.84
7.8 Ba	92.3	0.061	0.213	0.730	2.180	132.94
20.1 Ba	80.0	0.004	0.021	0.084	0.540	199.39

33.4 Ba	66.7	0,022	0.052	0.123	0.907	166.20
50.1 Ba	50.0	1.770	3.500	7.802	10.54	127.84
66.8 Ba	33.3	6.109	3.550	9.900	9.773	72.25

Максимальное значение средней скорости окисления соответствует около эвтектическим и эвтектическим составам, содержащим 60,1 и 77,1 ат.% Sr, которым соответствует величина энергии активации, равная 127,83-41,54 кДж/моль.

Согласно данным [38] для исследования были выбраны сплавы, содержащие 1,0; 2,1; 4,6; 7,7; 20; 33,3; 50 и 63 ат.% Ва. Получены результаты кажущейся энергии активации и зависимости средней скорости окисления от состава сплавов при температурах 873-1173 К.

# 1.3. Электрохимическое поведение сплавов системы Al-Fe, Al-Si, Al-Ca (Sr, Ba)

Коррозионно-электрохимическое поведение сплавов алюминия С железом. Электродный потенциал меняется незначительно, поскольку потенциал FeAl<sub>3</sub> равен -0,4÷-0,5 В, а у алюминия -0,8 В между алюминием (матрицей) и частицами FaAl<sub>3</sub> снижает коррозионную стойкость сплавов [42]. Состав твердого раствора фазы FaAl<sub>3</sub> достаточно велик, так как несколько сотых долей % Fe сегрегирует по границе субзерна и зерна, где в итоге может привести их к МКК [42]. Следовательно, добавки, образующие дисперсные частицы состава FaAl<sub>3.</sub> заметно меняют характер коррозии последовательно от межкристаллитной коррозии до питтинговой коррозии. По опыту, работе [43], результаты В коррозионных исследований описанному алюминия, легированных железом, представлены в таблице 1.9. Все значения опытов по электрохимическим потенциалам, которые пересчитаны на электроде н.в.э. Повышение содержания железа в составе Fe-Al закономерно свободной смещает потенциалы коррозии, репассивации И питтингообразования в область положительных значений.

21

**Таблица 1.9** – Влияние железа на коррозионно-электрохимические характеристики алюминия в среде электролита 3%-ного раствора NaCl [43]

22

Содержание	-Е <sub>св.кор</sub>	- $E_{\kappa op}$	-Е <sub>рп</sub>	-Е <sub>п.о</sub>	-Е' <sub>п.о</sub>	$\Delta E_{\text{nac.}}$	$A/m^2$	г/м <sup>2</sup> •час
железа в			•					
алюминии			I	3			i <sub>кор<sup>.</sup>10<sup>-2</sup></sub>	K•10 <sup>-3</sup>
мас.%								
1,0.10-3	0,78	0,76	0,55	0,48	0,46	0,38	0,30	1,00
1,5•10 <sup>-3</sup>	0,76	0,76	0,55	0,48	0,46	0,36	0,33	1,11
<b>5</b> •10 <sup>-3</sup>	0,75	0,76	0,55	0,48	0,46	0,36	0,35	1,17
0,01	0,70	0,73	0,54	0,46	0,45	0,35	0,40	1,34
0,15	0,54	0,57	-	0,40	0,45	0,35	0,50	1,67
0,20	0,53	0,56	0,50	0,36	0,42	0,35	1,0	3,35
0,3	0,52	0,55	-	0,37	0,41	0,35	1,2	4,69
1,0	0,53	0,50	-	0,42	0,42	0,33	2,0	8,04
1,5	0,50	0,55	0,52	0,40	0,40	0,30	2,7	26,8
2,18	0,57	0,55	0,54	-	0,41	0,44	0,8	13,4
3,00	0,51	0,50	0,52	0,42	0,40	0,35	5,0	16,7

Коррозионно-электрохимическое поведение сплавов алюминия с кремнием. В качестве материала-основы рассматривалось два состава: Al+7маc.%Si и Al+12маc.%Si. В таблице 1.10 представлены результаты потенциодинамических исследований образцов сплавов, которые получены при развёртке потенциала со скоростью 5мB/с в хлорсеребряному электроду сравнения по данным авторов [3, 44].

Потенциалы свободной коррозии обоих сплавов находятся в пассивной области анодных поляризационных кривых. Исследования показали, что максимальную дисперсность в Al-Si-эвтектике можно достичь введением в

расплав до 0.1% стронция, причём дальнейшее увеличение третьего компонента приведёт к ухудшению коррозионной скорости (токи пассивации и питтингообразования возрастут), произойдёт изменение формы кристаллов эвтектического кремния от округлой до игольчатой [3, 44].

**Таблица 1.10** – Электрохимические характеристики сплавов системы Al-Si, в среде 3%-ного электролита NaCl [3, 44]

Сплав		В	A/m <sup>2</sup>		
Chinab	-Есв.корЕп.п.		-Еп.о.	іп.п.	іп.о.
АК7	0,710	1,10	0,620	3,6	2,5
AK12	0,705	1,08	0,635	3,8	2,6

Необходимо отметить, что на коррозионную стойкость силуминов влияют не только содержащиеся В них примеси. Испытания, предусматривавшие оценку коррозионной стойкости по потере массы, показали, что на коррозионную стойкость сплава АЛ5 отрицательно влияют примеси Fe и Ni. Коррозионная стойкость сплавов АЛ4 и АЛ5 отрицательно влияет на примеси олова и свинца, чем железа, меди и никеля. Бериллий не влияет на коррозионностойкость сплава АЛ9, титан (0.17%) повышает коррозионностойкость сплава АЛ4, а никель снижает коррозионностойкость сплава АЛ9 [3, 44].

Коррозионное поведение сплавов алюминия с элементами подгруппы кальция. В литературе отсутствуют систематические данные по исследованию коррозионно-электрохимического поведения алюминиевых сплавов с элементами подгруппы кальция.

Сотрудниками лаборатории «Коррозионностойкие материалы» Института химии имени В.И. Никитина Академии наук Республики Таджикистан изучено воздействие рН-среды коррозионноэлектрохимического поведения сплавов системы Al-Ca (Sr, Ba). После предварительной обработки образцов сплавов их вводили в ячейку для исследования. Результаты опытов представлены в таблице 1.11. Постоянное значение электрохимических потенциалов для сплавов Al-Sr и Al-Ba определяется в первые часы эксперимента. Опыт проводили в электролите 0,5н NaCl, pH-среды которого регулировали добавлением 0,1н HCl, 0,1н NaOH в положительную область значений потенциалов до достижения электродного потенциала питтингообразования (таблица 1.12). Зависимость величины установившихся потенциалов коррозии сплавов алюминия в зависимости от содержания щелочноземельными металлами приведена в таблице 1.13.

**Таблица 1.11** – Изменение потенциалов свободной коррозии (х.с.э.) во времени сплавов системы Al-Ca

Время	Содержание кальция, мас.%								
выдержки, час	0.1	0.5	1.0	8.0					
0	-0.99	-1.02	-1.05	-1.09					
96	-1.01	-1.05	-1.10	-1.16					
144	-1.02	-1.06	-1.15	-1.20					
196	-1.03	-1.07	-1.18	-1.23					
240	-1.04	-1.08	-1.20	-1.27					
336	-1.04	-1.09	-1.21	-1.29					
384	-1.04	-1.09	-1.23	-1.30					

Потенциал питтингообразования изменяется от -1,161 мВ (0,3% кальций) до -1,209 мВ (8% кальций). В случае введения кальция в сплав системы Al-Sr рост его концентрации повышает ток пассивации от 0,02 A/м<sup>2</sup> (0,2% стронций) до 0,1 A/м<sup>2</sup> (11% стронций) [46].

Увеличение потенциала в сторону отрицательных значений наиболее заметно для сплавов алюминия, легированных кальцием, наиболее эффективными проекторами можно считать сплавы с кальцием (таблица 1.14).

Содержание					р	Н-сред	(a			
стронция в алюминии, мас.%	-Е, В	2	3	4	5	6,8	8	10	11	12
	Ен.п.	1,10	1,10	1,10	1,10	1,17	1,18	1,20	1,20	1,12
	Еп.п.	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,10	1,10	1,00	1,10
0,1	Еп.о.	0,62	0,63	0,64	0,62	0,63	0,62	0,63	0,63	0,63
	ін.п.	0,18	0,18	0,10	0,16	0,16	0,32	0,12	0,28	0,06
	іп.п.	0,16	0,16	0,08	0,14	0,14	0,28	0,10	0,24	0,04
	Ен.п.	1,10	1,10	1,10	1,10	1,20	1,10	1,20	1,20	1,12
	Еп.п.	1,00	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,00	1,00
1,0	Еп.о.	0,63	0,63	0,64	0,63	0,64	0,63	0,65	0,63	0,64
	ін.п.	0,14	0,14	0,10	0,16	0,20	0,10	0,16	0,30	0,10
	іп.п.	0,10	0,12	0,08	0,14	0,18	0,08	0,14	0,28	0,08
	Ен.п.	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.20	1.20	1.12
8,0	Еп.п.	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.10
	Еп.о.	0.70	0.70	0.70	0.69	0.69	0.70	0.69	0.70	0.70

**Таблица 1.12** – Влияние рН-среды на электрохимические параметры сплавов алюминия со стронцием

**Таблица 1.13** – Зависимость потенциалов (В) свободной коррозии (х.с.э.) для сплавов алюминия с кальцием, стронцием и барием [46, 46]

Содержание	Содержание щелочноземельного металла, мас.%								
ЩЗМ в	0.0	2.7	4.0						
алюминии	0,3	2,5	4,0	8,0					

Ba -0,799 -0,810 -0,819 -0,8	19
Sr -0,829 -0,899 -0,949 -1,0	39
Ca -1,161 -1,169 -1,189 -1,2	09

**Таблица 1.14** – Изменение во времени потенциала (-Е, В) алюминиевокальциевого сплава при гальваностатической поляризации плотности тока 1.5 А/м<sup>2</sup> [46]

Время выдержки,	Содержание кальция, мас.%								
час.	1,0	3,0	8,0						
0	0,730	0,730	0,750						
24	0,790	0,820	0,850						
48	0,810	0,850	0,880						
72	0,830	0,865	0,900						
96	0,840	0,885	0,905						



Рисунок 1.4 – Изменение КПД сплавов системы Al-Ca (Sr, Ba) [46]

## 1.4. Характеристика исходного алюминиевого сплава АЖ5К10

По данным самой последней работы, в равновесии с алюминиевым твердым раствором в системе Al-Fe-Si находятся две тройные фазы Fe<sub>2</sub>SiAl<sub>8</sub> ( $\alpha$ ) и FeSiAl<sub>5</sub> ( $\beta$ ). Третья фаза FeSi<sub>2</sub>Al<sub>4</sub> ( $\gamma$ ) присутствует в сплавах, богатых кремнием, а четвертая FeSiAl<sub>3</sub> ( $\delta$ ) имеется в сплавах, богатых Fe и Si [3, 4, 42]. Нонвариантность превращения в Al-углу приведена в таблице 1.15, а проекция поверхности ликвидус показана на рисунке 1.5.

Соединение Fe<sub>2</sub>SiAl<sub>8</sub> (31.6% Fe и 7.8% Si), которое часто приводят в виде Fe<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>Al<sub>12</sub> (30.7%Fe и 10.2%Si), обладает областью гомогенности в 30-33%Fe интервале концентраций И 6-12%Si [42]. Оно имеет гексагональную решетку (пространственная группа P63/mmc) с параметрами  $\alpha = 12.3$ Å и с = 26.3Å;  $\gamma = 3.58$  г/см<sup>3</sup>. Фаза FeSiAl5 (25,6% Fe и 12,8 Si) кристаллизуется в виде китайских иероглифов. Ее область гомогенности находится в пределах 25-30% Fe и 1.2-1.5% Si. Фаза имеет моноклинную решетку с параметрами  $\alpha = b = 6.12$ Å и с = 41.5Å,  $\alpha = 91^{\circ}$ ,  $\gamma = 3.3 \div 3.35$  г/см<sup>3</sup>, а HV 5800MH/м<sup>2</sup>. Она образуется в форме тонких пластин, которые в сечении плоскостью микрошлифа имеют вид длинных иголок. [42].

**Таблица 1.15** – Нонвариантные реакции в сплавах системы Al – Fe – Si, богатых алюминием [42]

Реакция			Содер	эжани	е эле	менто	B, %, I	з фаза	X
	t, °C		1	2	r		3	4	ļ
		Fe	Si	Fe	Si	Fe	Si	Fe	Si

$\mathcal{K} \rightarrow Al + FeAl_3$	655	1,9	-	0,04	-	35,0	-	-	-
Ж→Al+Si	577	-	12,5	-	1,64	-	99,8	-	-
Ж→Al+Si+FeSiAl <sub>5</sub>	576	0,7	12,0	0,01	1,5	0,01	99,7	~25	~15
$\mathcal{K}$ +FeAl <sub>3</sub> $\rightarrow$ Fe <sub>2</sub> SiAl <sub>8</sub> +FeSiAl <sub>3</sub>	710	7,5	12,5	35,0	0,1	32,9	7,0	34	17,0
$\mathcal{K} + FeSiAl_3 \rightarrow Fe_2SiAl_8 + FeSiAl_5$	675	6,0	13,0	33,0	16,0	32,9	7,0	25,0	15,0
Ж+FeSiAl <sub>3</sub> +FeSiAl <sub>4</sub> →FeSiAl <sub>5</sub>	701	7,1	14,1	34,0	15,0	25,5	25,6	25,0	13,0
$\mathcal{K}$ +FeAl <sub>3</sub> $\rightarrow$ Al+Fe <sub>2</sub> SiAl <sub>8</sub>	629	2,4	4,0	36,0	0,3	0,05	0,61	33,2	7,01
ℋ+Fe <sub>2</sub> SiAl <sub>8</sub> →FeSiAl <sub>5</sub>	612	1,7	6,4	32,9	6,9	0,03	1,1	25	13
Ж+FeSi <sub>2</sub> Al₄→FeSiAl₅+Si	596	1,5	1,3	25,4	25,4	24,9	13	<0,1	99,8
Примечение. I – IV – порядков	ые но	мера	фаз в	реакц	иях		•	•	•





Рисунок 1.5 – Алюминиевый угол диаграммы A1 – Fe – Si: а – проекция поверхности ликвидуса; б – распределение фазовых областей в твердом состоянии [1]. \*химический состав (мас.%) сплава АЖ5К10 на диаграмме

Тетрагональная фаза FeSi<sub>2</sub>Al<sub>4</sub> (25.4%Fe и 25.5%Si) с параметрами  $\alpha = 6.12 \div 6.16$ Å и с = 9.484-9.49Å имеет  $\gamma = 3.3 \div 4.4$ г/см<sup>3</sup>. Решетка фазы FeSiAl<sub>3</sub> (33,9% и 16,9%Si) моноклинная с центрированным основанием и параметрами  $\alpha = 17.8$ Å, b = 10.25Å, c = 8.90Å,  $\beta = 132^{\circ}$  [42].

Сообщается об образовании соединения, содержащего 27-35% Fe и 6-8% Si, с кубической решеткой (пространственная группа Im3, 138 атомов в элементарной ячейке) и параметром  $\alpha = 12.5 \div 12.55$ Å. Эта фаза неравновесное соединение; для ее стабилизации требуется небольшое количество марганца, хрома и меди. В этом случае фаза представляет собой соединение Mn<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>Al<sub>15</sub> или Cr<sub>4</sub>Si<sub>4</sub>Al<sub>13</sub> с расширенными областями гомогенности, в которых железо замещает большую часть марганца или хрома. В работе [42] показано, что кубическая фаза может появляться также в промышленном сплаве в неравновесных условиях (в слитках, отлитых непрерывным методом) (рисунок 1.6).



**Рисунок 1.6** – Разрез диаграммы А1-Fe-Si при 0,7% Fe [42]

В соединении FeAl<sub>3</sub> растворяется менее 0,2%Si, железо в кремнии практически не растворяется. На рисунке 1.6 показано наиболее вероятное распределение фазовых областей в твердом состоянии, а 100 – разрез при 0,7%Fe.

В системе A1-Fe-Si существуют фазы FeAl<sub>6</sub>, FeAl<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>SiAl<sub>8</sub>, FeSiAl<sub>5</sub> и FeSiAl<sub>4</sub>. В материалах, которые подвергаются термической обработке, равновесие достигается путем диффузии в твердом состоянии, так что фаза FeSiAl<sub>5</sub> часто имеет вид китайских иероглифов, характерный для соединения Fe<sub>2</sub>SiAl<sub>8</sub>, или вид пластин, типичный для фазы FeSi<sub>2</sub>Al. Поэтому идентификация фаз только по форме может быть ошибочной. Изучено распределение фазовых областей в неравновесных условиях. Но так как в этих работах точно не указана методика получения сплавов, приведенные данные следует рассматривать только как ориентировочные [42].

Во всяком случае появление фаз FeAl<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>SiAl<sub>8</sub> и FeSi<sub>2</sub>Al<sub>4</sub> возможно во всех тех сплавах, где эти соединения кристаллизуются первично, а

свободный кремний, как правило, входящий в состав эвтектики, может присутствовать даже в сплавах с соотношением концентраций Fe:Si = 4:l, поскольку его растворимость уменьшается при быстром охлаждении теплоты образования сплавов, а другие термодинамические характеристики в работах [42].

#### 1.5. Выводы по обзору литературы и постановка задачи

Анализ литературы по структурообразованию, теплоемкость, свойства характеристики двойных тройных И И сплавов алюминия С модифицирующими металлами показал возможность использования их в промышленности и различных отраслях техники. Изучение коррозионного поведения алюминиевых сплавов в агрессивных коррозионных средах остаётся весьма актуальным вопросом, поскольку сплавы подвергаются разнообразным металлических видам коррозии В процессах, при эксплуатации, термообработке и т.д. В денежном эквиваленте потери от коррозии составляют несколько миллионов долларов. Анализ литературы свидетельствует, что в этом направлении исследования для сплавов, которые планируется изучить В данной работе проведены недостаточно. Литературные данные показывают, что подробно исследовано окисление сплавов алюминия с элементами кальция, стронция, бария и их сплавов в твердом и жидком состояниях. Также известно, что примеси железа трудно выделить из алюминия.

Обзор литературы показывает, что имеются сведения о свойствах, структурообразовании, теплофизических свойствах и кинетике окисления промышленных алюминиевых сплавов. Но в литературе отсутствует данные о физико-химических свойствах алюминиевого сплава АЖ5К10, модифицированного щелочноземельными металлами. Также имеется информация о коррозионном поведении вышеуказанных сплавов.

С учетом изложенного ставится определенная задача синтезировать алюминиевый сплав АЖ5К10 со щелочноземельными металлами в различной

концентрации с использованием диаграмм состояния данных четырех систем, провести исследование физико-химических свойств синтезированных сплавов и установить влияние состава, температуры и характера среды на их свойства.

## ГЛАВА 2. ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ТЕПЛОЕМКОСТИ И ИЗМЕНЕНИЙ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АЖ5К10, МОДИФИЦИРОВАННОГО КАЛЬЦИЕМ, СТРОНЦИЕМ И БАРИЕМ

# 2.1. Теория метода и схема установки для измерения теплоёмкости твердых тел

В литературе существует много методов экспериментального изучения теплофизических свойств различных твёрдых тел, которые характеризуются изменением состояния различных веществ в зависимости от температуры. Самым распространенным является метод сравнения скоростей охлаждения двух образцов, эталонного и исследуемого по закону охлаждения Ньютона-Рихмана, позволяющий непосредственно определять не только температуру фазовых превращений, но и другие физические характеристики твердого тела. Метод сравнения скоростей охлаждения двух образцов позволяет с достоверной точностью определять температуры, сопровождающиеся тепловыми эффектами без значительного изменения удельного объема системы, а также зависимость теплоемкости веществ от температуры [47-51].

При проведении расчетов термодинамических функций широко используются зависимости теплоемкости веществ температуры. OT Теплоемкость твердых, жидких и газообразных веществ повышается с температурой. Для одноатомных (благородных) ЭТО правило не выполняется, т.к. их теплоемкости не зависят от температуры. Сложная  $C_{P}^{0} = f(T)$  наблюдается у твердого вещества. зависимость Впервые разработка теории теплоемкости твердого вещества предпринята А. Эйнштейном. В узлах кристаллической решетки одноатомного твердого вещества атомы находятся в непрерывном колебательном движении. Согласно теории теплоемкости твердого вещества, разработанной А. Эйнштейном, колебания атомов являются гармоническими. Дальнейшее развитие квантовой теории теплоёмкости твердого вещества получило в работах Дебая и ряда других ученых. Дебай рассматривает твердое тело при низких температурах как непрерывную упругую среду, в которой в результате взаимодействия атомов, группы атомов, ионов возникают колебания с различными частотами. Для выражения зависимости теплоемкости твердого тела от температуры в широких ее переделах не имеется простого математического соотношения. Для этого наиболее точные выражения выведены в виде формул или функций Дебая, Эйнштейна и Нернста-Линдемана, которые основаны на квантовомеханических представлениях 0 строении материи. При высоких температурах теплоемкость веществ более сложной структуры отклоняется от теории Дебая. Теория нагрева тонких изделий в условиях свободной конвекции освещена в работах [49-51].

С достаточной для современных прикладных расчетов и технологических процессов степенью точности теплоемкости твердых тел могут быть определены только экспериментально. При произвольной

33

температуре для неизвестного материала получение значений теплоемкости является как сложной, так и важной задачей науки и техники [51].

Расчет теплоемкости основывается на следующих уравнениях. Количество тепла, переданное образцам объёма *dV* за время *d* $\tau$ , равно

$$\delta Q = C_P^0 \cdot p \cdot d\tau \cdot dV, \qquad (2.1)$$

где  $C_p^0$ -удельная теплоемкость металла, *p*-плотность металла, *T*температура образца (принимается одинаковая во всех точках образца, так как линейные размеры тела малы, а теплопроводность металла велика).

Величину *бQ* можно подсчитать кроме того по закону Ньютона-Рихмана:

$$\delta Q = a(T - T_0) \cdot dS \cdot d\tau, \qquad (2.2)$$

где *dS*-элемент поверхности, *T*<sub>0</sub>-температура окружающей среды, *а*-коэффициент теплоотдачи.

Приравнивая выражения (2.1) и (2.2), получим

$$C_{P}^{0} \cdot p \cdot d\tau \cdot dV = a(T - T_{0}) \cdot dS \cdot d\tau.$$
(2.3)

Количество тепла, которое теряет весь объем образца, равно

$$Q = \int_{V} C_{P}^{0} \cdot p \cdot d\tau \cdot dV = \int_{S} a(T - T_{0}) \cdot dS \cdot d\tau.$$
(2.4)

Полагая, что  $C_p^0$ , *p* не зависят от координатах точек объема, а *a*, *T* и  $T_0$  не зависят от координат точек поверхности образца, можно написать:

$$C_{P}^{0} \cdot p \cdot V \frac{dT}{d\tau} = a(T - T_{0})S, \qquad (2.5)$$

ИЛИ

$$C_P^0 \cdot m \frac{dT}{d\tau} = a(T - T_0)S, \qquad (2.6)$$

где V-объем всего образца, а *p*·V=*m*-масса, S-площадь поверхности всего образца.

Соотношение (2.6) для двух образцов одинакового размера при допущении, что  $S_1 = S_2, T_1 = T_2, \alpha_1 = \alpha_2$  пишется так:

$$C_{P_1}^{0} = C_{P_2}^{0} \cdot \frac{m_2}{m_1} \cdot \frac{\left(\frac{dT}{d\tau}\right)_2}{\left(\frac{dT}{d\tau}\right)_1} = C_{P_2}^{0} \frac{m_2}{m_1} \cdot \frac{\left(\frac{\Delta T}{\Delta \tau}\right)_2}{\left(\frac{\Delta T}{\Delta \tau}\right)_1}.$$
(2.7)

Следовательно, зная массы образцов  $m_1$  и  $m_2$ , скорости их охлаждения и удельную теплоемкость  $C_{P_1}^0$ , можно вычислить скорость охлаждения и удельную теплоемкость  $C_{P_2}^0$ , из уравнения:

$$C_{P_2}^{0} = C_{P_1}^{0} \frac{m_2}{m_1} \cdot \frac{\left(\frac{dT}{d\tau}\right)_1}{\left(\frac{dT}{d\tau}\right)_2}, \qquad (2.8)$$

где  $m_1 = \rho_1 V_1$  –масса первого образца,  $m_2 = \rho_2 V_2$  –масса второго образца,  $\left(\frac{dT}{d\tau}\right)_1, \left(\frac{dT}{d\tau}\right)_2$  - скорости охлаждения образцов при данной температуре.

Для определения скорости охлаждения строят кривые охлаждения (термограммы) данных образцов. Кривая охлаждения представляет собой зависимость температуры образца от времени при охлаждении его в неподвижном воздухе [52-64].

Сплавы алюминия с железом, кремнием и щелочноземельными металлами получали в шахтной лабораторной печи СШОЛ при температуре 850-900 <sup>о</sup>С с добавлением лигатуры алюминия с 10 мас.% Са, Sr и Ba к сплаву АЖ5К10. Контроль элементного состава сплавов проводился в Центральной заводской лаборатории Алюминиевой компании ГУП «ТАлКо», а также взвешиванием шихты и полученных сплавов. Образцы сплавов имели размер длиной 30 мм и диаметром 16 мм для исследования теплоемкости. Теплоемкость сплава АЖ5К10, модифицированного кальцием, стронцием и барием, измеряли в режиме «охлаждения».

Изменение теплоемкости проводилось по методике, описанной в работах [49-51, 64]. Нами исследование теплоёмкости металлов проводилось на установке, схема которой представлена на рисунке 2.1. Схема установки для измерения теплоёмкости твёрдых тел, включает узлы: электропечь (3), смонтированная на стойке (6), по которой она может перемещаться вверх и

вниз (стрелкой показано направление перемещения). Образец (4) и эталон (5) (тоже могут перемещаться) представляют собой цилиндр длиной 30 мм и диаметром 16 мм с высверленными каналами с одного конца, в которые вставлены термопары. Концы термопар подведены к цифровому термометру «Digital Multimeter DI9208L» (7, 8 и 9). Электропечь (3) запускается через (ЛАТР) лабораторный автотрансформатор (1),установив нужную температуру с помощью терморегулятора (2). По показаниям цифровых термометров «Digital Multimeter DI9208L», фиксируется значение начальной температуры. Вдвигаем образец и эталон в электропечь нагреваем до нужной температуры, контролируя температуру по показания цифровых термометров «Digital Multimeter DI9208L» на компьютере (10). Образец и эталон одновременно выдвигаем из электропечи и с этого момента фиксируем Записываем показания цифрового термометра «Digital температуру. Multimeter DI9208L» на компьютер через каждый 10с, до охлаждения температуры образца и эталона ниже 35 <sup>0</sup>С [64].



Рисунок 2.1 – Установка для определения теплоёмкости твёрдых тел в режиме «охлаждения»: 1-автотрансформатор; 2-терморегулятор; 3электропечь; 4-образец измеряемый; 5-эталон 6-стопка электропечи; 7-
цифровой термометр измеряемого образца; 8-цифровой термометр общего назначения; 9-цифровой термометр эталона; 10-регистрационный прибор.

Обработку результатов измерений осуществляли с помощью программы «MS Excel». Графики строились с использованием программы «Sigma Plot». Коэффициент корреляции Rкорр =  $1,0 \div 0,9507$  подтверждал правильность выбора аппроксимирующей функции. Для определения температуры использовали многоканальный цифровой термометр, который позволял фиксировать результаты измерений прямо на компьютере в виде таблиц. Временной интервал фиксации температуры составлял 10 секунд. Относительная ошибка измерения температуры в интервале от 40 °C до 400 °C составляла  $\pm 1\%$ , а в интервале более 400 °C  $\pm 2.5\%$ . Погрешность измерение теплоемкости по предлагаемой методике не превышает 4%.

Полученные зависимости температуры сплавов от времени с достаточной точностью описываются уравнением вида:

$$T = ae^{-b\tau} + pe^{-k\tau}, \qquad (2.9)$$

где *a*, *b*, *p*, *k*-постоянные для данного образца; т-время охлаждения.

Дифференцируя (2.9) по т, получаем уравнение для определения скорости охлаждения образцов из сплавов:

$$\frac{dT}{d\tau} = -abe^{-b\tau} - pke^{-k\tau}.$$
(2.10)

По этой формуле нами были вычислены скорости охлаждения эталона и образцов из сплава АЖ5К10, модифицированного кальцием, стронцием и барием.

# 2.2. Влияние кальция на температурную зависимость удельной теплоемкости и изменений термодинамических функций алюминиевого сплава АЖ5К10 [1-А, 11-А, 12-А]

В данном разделе представлены результаты определения значений теплоемкости и изменений энтальпии, энтропии и энергии Гиббса для

алюминиевого сплава АЖ5К10, модифицированного кальцием, по известной удельной теплоёмкости эталонного образца из меди с использованием скорости охлаждения образцов.

График температуры охлаждения изучаемых образцов из сплавов от времени представлен на рисунке 2.2. Процесс охлаждения наблюдается для всех сплавов почти одинаково, и температуры идентично уменьшаются. При охлаждении на кривых  $T = f(\tau)$  для образцов из сплава АЖ5К10, модифицированного кальцием, не обнаружены термические остановки, связанные с фазовым переходом или превращением.

Кривые скорости охлаждения сплавов от температуры представлены на рисунке 2.3. Обработкой кривых охлаждения установлены экспериментальные значения коэффициентов *a, b, p, k, ab, pk* уравнения (2.9), которые приведены в таблице 2.1. Расчет скорости охлаждения образцов проводился по уравнению (2.10).

Для определения удельной теплоемкости сплава АЖ5К10 с кальцием использовали формулу (2.8). Были получены полиномы температурной зависимости удельной теплоемкости сплава АЖ5К10 с кальцием и эталона (Си марки М00), описываемые уравнением:

$$C_P^0 = a + bT + cT^2 + dT^3.$$
(2.11)



**Рисунок 2.2** – Зависимость температуры от времени охлаждения для образцов из сплава АЖ5К10 с кальцием и эталона в интервале 200-600К (б)



**Рисунок 2.3** – Температурная зависимость скорости охлаждения образцов из сплава АЖ5К10 с кальцием и эталона

**Таблица 2.1** – Значения коэффициентов a, b, p, k, ab, pk в уравнении (9) для сплава АЖ5К10, модифицированного кальцием и эталона

Содержание Са в сплаве, мас.%	a, K	$b \cdot 10^{-3},$ $c^{-1}$	ρ, Κ	$k \cdot 10^{-5},$ $c^{-1}$	$a \cdot b,$ $K \cdot c^{-1}$	$pk \cdot 10^{-2},$ $K \cdot c^{-1}$
АЖ5К10(1)	488,57	6,64	309,43	5,30	3,25	1,64
(1)+0.05%Ca	494,58	6,59	311,79	5,80	3,26	1,81
(1)+0.1%Ca	503,26	7,14	313,81	5,20	3,60	1,63
(1)+0.5%Ca	503,44	7,29	325,14	6,40	3,67	2,08
(1)+1.0%Ca	498,91	7,24	314,21	5,39	3,61	1,69
Эталон Си	481,34	6,48	329,32	8,12	3,12	2,67

Значения коэффициентов уравнении (2.11) представлены в таблице 2.2. В таблице 2.3 приведены результаты расчета температурной зависимости удельной теплоемкости сплава АЖ5К10 с кальцием и эталона (Си марки M00) через 100К. Видно, что в исследованном температурном интервале с ростом температуры теплоемкость сплава АЖ5К10 с кальцием растёт, а от содержания кальция уменьшается.

**Таблица 2.2** – Значения коэффициентов *a*, *b*, *c*, *d* в уравнении (11) для сплава АЖ5К10, модифицированного кальцием и эталона

Содержание		$1 \ 10^{-2}$	10-5	1 10-8	Коэффициент
Са в сплаве,	<i>а</i> , Дж/кг•К	<i>b</i> ·10 , Дж/кг·К <sup>2</sup>	<i>с</i> ·10 , Дж/кг·К <sup>3</sup>	<i>а</i> ·10 , Дж/кг·К <sup>4</sup>	корреляции
мас.%					R, %
АЖ5К10(1)	-4,0493	2,95	-5,3	3,13	0,9570
(1)+0.05%Ca	-3,8881	2,83	-5,1	2,95	0,9599
(1)+0.1%Ca	-4,3605	3,11	-5,6	3,26	0,9507
(1)+0.5%Ca	-4,5189	3,15	-5,6	3,2	0,9568
(1)+1.0%Ca	-4,5015	3,18	-5,7	3,37	0,9509
Эталон Си	0,3245	0,0275	-0,0287	0,0142	1,0000

**Таблица 2.3** – Температурная зависимость удельной теплоемкости сплава АЖ5К10 с кальцием и эталона

Содержание Са в		Т, К						
сплаве, мас.%	300	400	500	600	700	800	$C^0_P$ , %	
АЖ5К10(1)	0,8488	1,2259	1,2882	1,2235	1,2196	1,4643	72,51	
(1)+0,05%Ca	0,8399	1,2159	1,2869	1,2299	1,2219	1,4399	71,44	
(1)+0,1%Ca	0,8187	1,2219	1,2895	1,2171	1,2003	1,4347	75,24	
(1)+0,5%Ca	0,7821	1,2171	1,3061	1,2411	1,2141	1,4171	81,19	
(1)+1,0%Ca	0,7734	1,1753	1,2360	1,1577	1,1426	1,3929	80,10	
Poct $C_P^0$ , %	-8,88	-4,13	-4,05	-5,38	-6,31	-4,88		
Эталон Си	0,3850	0,3977	0,4080	0,4169	0,4251	0,4335	12,60	

Используя вычисленные данные по теплоемкости сплава АЖ5К10, модифицированного кальцием, и экспериментально полученные скорости охлаждения образцов, был рассчитан коэффициент теплоотдачи (*a*, Bт/м<sup>2</sup>·K)

для сплава АЖ5К10 с кальцием и эталона (Си марки М00) по следующей формуле:

$$a = \frac{C_P^0 m \frac{dT}{d\tau}}{(T - T_0) \cdot S}.$$
 (2.12)

Для сплава АЖ5К10, модифицированного кальцием, температурная зависимость коэффициента теплоотдачи представлена на рисунке 2.4.



**Рисунок 2.4** – Температурная зависимость коэффициента теплоотдачи алюминиевого сплава АЖ5К10 с кальцием и эталона

Для расчета температурной зависимости изменений энтальпии, энтропии и энергии Гиббса по (2.13)-(2.15) для сплава АЖ5К10 с кальцием были использованы интегралы от удельной теплоемкости по уравнению (2.10):

$$\left[H^{0}(T) - H^{0}(T_{0})\right] = a(T - T_{0}) + \frac{b}{2}(T^{2} - T_{0}^{2}) + \frac{c}{3}(T - T_{0}^{3}) + \frac{d}{4}(T^{4} - T_{0}^{4}); \qquad (2.13)$$

$$\left[S^{0}(T) - S^{0}(T_{0})\right] = a \ln \frac{T}{T_{0}} + b(T - T_{0}) + \frac{c}{2}(T^{2} - T_{0}^{2}) + \frac{d}{3}(T^{3} - T_{0}^{3}); \qquad (2.14)$$

$$[G^{0}(T) - G^{0}(T_{0})] = [H^{0}(T) - H^{0}(T_{0})] - T[S^{0}(T) - S^{0}(T_{0})], \qquad (2.15)$$

Результаты расчета температурной зависимости изменений энтальпии, энтропии и энергии Гиббса для сплава АЖ5К10 с кальцием и эталона (Си марки М00) по уравнениям (2.13)-(2.15) через 100К представлены в таблице 2.4.

**Таблица 2.4** – Температурная зависимость изменений термодинамических функций сплава АЖ5К10 с кальцием и эталона

Содержание Са в		$[H^{0}(T) -$	$-H^{0}(T_{0}^{*})],$ H	кДж∕кг дл	я сплавов				
сплаве, мас.%	300 K	400 К	500 К	600 К	700 K	800 K			
АЖ5К10(1)	1,560	108,701	236,247	362,108	482,973	614,314			
(1)+0,05%Ca	1,535	106,988	232,915	357,568	476,895	604,548			
(1)+0,1%Ca	1,504	107,145	234,697	360,379	479,970	608,812			
(1)+0,5%Ca	1,435	105,079	233,322	361,165	482,809	611,652			
(1)+1,0%Ca	1,420	102,541	225,106	345,107	458,753	582,474			
Эталон Си	0,712	39,869	80,168	121,419	163,517	206,442			
[S <sup>0</sup> (T) – S <sup>0</sup> (T <sub>0</sub> <sup>*</sup> )], кДж/кг·К для сплавов									
АЖ5К10(1)	0,005	0,311	0,595	0,825	1,011	1,186			
(1)+0,05%Ca	0,005	0,308	0,590	0,819	1,004	1,175			
(1)+0,1%Ca	0,005	0,306	0,591	0,820	1,004	1,176			
(1)+0,5%Ca	0,005	0,300	0,586	0,819	1,007	1,178			
(1)+1,0%Ca	0,005	0,293	0,566	0,785	0,960	1,125			
Эталон Си	0,002	0,115	0,205	0,280	0,345	0,402			
	$[G^{0}(T) - 0]$	$G^{0}(T_{0}^{*})], \mathbb{K}$	(ж/кг для	сплавов					
АЖ5К10(1)	-0,005	-15,635	-61,352	-132,806	-224,857	-334,655			
(1)+0,05%Ca	-0,018	-16,219	-62,250	-133,876	-226,008	-335,649			
(1)+0,1%Ca	-0,005	-15,317	-60,556	-131,537	-223,006	-331,952			
(1)+0,5%Ca	-0,004	-14,905	-59,559	-130,257	-221,819	-331,039			
(1)+1,0%Ca	-0,004	-14,611	-57,960	-125,980	-213,505	-317,695			
Эталон Си	-0,002	-6,107	-22,243	-46,586	-77,903	-115,311			

 $T_0 = 298,15$  K.

В целом выявлено, что с увеличением температуры величины теплоемкость, энтропия и энтальпия алюминиевого сплава АЖ5К10 с кальцием увеличиваются, а значение энергии Гиббса уменьшается. От содержания кальция теплоемкость исходного сплава АЖ5К10 уменьшается.

# 2.3. Влияние стронция на температурную зависимость удельной теплоемкости и изменений термодинамических функций сплава АЖ5К10 [2-А, 9-А, 13-А]

Графики температуры охлаждения изучаемых образцов из сплавов от времени представлены на рисунке 2.5. Процесс охлаждения для всех образцов достаточно близок друг к другу и температуры идентично уменьшаются. При охлаждении на кривых для образцов из сплава АЖ5К10 со стронцием не обнаружены термические остановки, связанные с фазовым переходом или превращением.



Рисунок 2.5 – Зависимость температуры образцов от времени охлаждения (т) для образцов из сплава АЖ5К10 со стронцием и эталона Cu (а) и в интервале 200-600К (б)

Кривые скорости охлаждения сплавов от температуры представлены на рисунке 2.6. Обработкой их установлены экспериментальные значения коэффициентов *a*, *b*, *p*, *k*, *ab*, *pk* уравнения (2.9), которые приведены в таблице 2.5. Расчет скорости охлаждения образцов проводился по уравнению (2.10).

**Таблица 2.5** – Значения коэффициентов *a*, *b*, *k*, *ab*, *pk* уравнений (2.9) для образцов и сплава АЖ5К10, модифицированного стронцием

Содержание Sr в сплаве, мас.%	<i>a</i> , K	$b.10^{-3},$ $c^{-1}$	р, К	$k \cdot 10^{-5},$ $c^{-1}$	a∙b, K∙c-1	$pk \cdot 10^{-2},$ K· $c^{-1}$
АЖ5К10(1)	488,56	6,63	309,42	5,29	3,24	1,63
(1)+0,05Sr	472,85	7,28	338,18	8,80	3,44	3,00
(1)+0,1Sr	466,34	7,16	327,56	8,55	3,33	2,80
(1)+0,5Sr	465,60	7,12	342,78	9,97	3,31	3,41
(1)+1,0Sr	464,74	7,48	325,57	8,13	3,47	2,64



Рисунок 2.6 – Зависимость скорости охлаждения от времени для образцов из сплава АЖ5К10, модифицированного стронцием и эталона Си

Для определения удельной теплоемкости сплава АЖ5К10 со стронцием использовали формулу (2.8). Были получены полиномы температурной зависимости удельной теплоемкости сплава АЖ5К10 со стронцием по уравнением (2.11). Значения коэффициентов уравнений (2.11) представлены в таблице 2.6.

**Таблица 2.6** – Значения коэффициентов *a*, *b*, *c*, *d* уравнений (2.11) для сплава АЖ5К10, модифицированного стронцием

Солержание Sr в	a	$b \cdot 10^{-2}$	$c \cdot 10^{-5}$	$d \cdot 10^{-8}$	Коэффициент
		U 10, $\Pi_{\rm M}/_{\rm MD}$ $U^2$	$U_{\rm Her}/m_{\rm s} U^3$	$\pi$ 10,	корреляции,
сплаве, мас.%	Дж/кі∙к	Дж∕кі∙к	Дж∕кі∙к	Дж∕кі∙к	<i>R</i> , %
АЖ5К10(1)	-4,0493	2,95	-5,30	3,13	0,9570
(1)+0,05%Sr	-4,4057	3,04	-5,30	3,00	0,9681
(1)+0,1%Sr	-4,2361	3,00	-5,34	3,09	0,9672
(1)+0,5%Sr	-4,3013	2,96	-5,13	2,91	0,9747
(1)+1,0%Sr	-4,4954	3,15	-5,65	3,29	0,9618

В таблице 2.7 приведены результата расчета температурной зависимости удельной теплоемкости сплава АЖ5К10, модифицированного стронцием через 100 К. Видно, что в исследованном температурном интервале с ростом температуры теплоемкость сплава АЖ5К10 со стронцием растёт, а от содержания стронция уменьшается.

Используя вычисленные значения теплоемкости сплава АЖ5К10 со стронцием и экспериментально полученные величины скорости охлаждения образцов, нами был рассчитан коэффициент теплоотдачи (*a*, BT/K·м<sup>2</sup>) для сплава АЖ5К10 со стронцием и эталона (Си марки М00) по формуле (2.12). Температурная зависимость коэффициента теплоотдачи для алюминиевого сплава АЖ5К10, модифицированного стронцием, представлена в таблице 2.8.

**Таблица 2.7** – Температурная зависимость удельной теплоёмкости сплава АЖ5К10, модифицированного стронцием

Содержание Sr в		Т, К						
сплаве, мас.%	300	400	500	600	700	800	C <sup>0</sup> <sub>p</sub> , %	
АЖ5К10(1)	0,8488	1,2259	1,2882	1,2235	1,2196	1,4643	72,51	
(1)+0,05%Sr	0,7543	1,1943	1,2943	1,2343	1,1943	1,3543	79,54	
(1)+0,1%Sr	0,7922	1,1975	1,2764	1,2143	1,1966	1,4087	77,82	
(1)+0,5%Sr	0,7474	1,1931	1,3112	1,2763	1,2630	1,4459	93,46	
(1)+1,0%Sr	0,7579	1,1702	1,2421	1,1710	1,1543	1,3894	83,32	
Рост С <sub>р</sub> , %	-10,71	-4,54	-3,58	-4,29	-5,35	-5,12		

**Таблица 2.8** – Температурная зависимость коэффициента теплоотдачи сплава АЖ5К10, модифицированного стронцием

Содержание Sr в	Т, К							
сплаве, мас.%	300	400	500	600	700	800		
АЖ5К10(1)	0,0043	0,0578	0,1028	0,1341	0,1521	0,1658		
(1)+0,05%Sr	0,0020	0,0457	0,0948	0,1353	0,1550	0,1687		
(1)+0,1%Sr	0,0026	0,0505	0,0979	0,1379	0,1552	0,1660		
(1)+0,5%Sr	0,0020	0,0391	0,0827	0,1206	0,1385	0,1504		
(1)+1,0%Sr	0,0025	0,0517	0,1006	0,1408	0,1587	0,1686		

Для расчета температурной зависимости изменений энтальпии, энтропии и энергии Гиббса по (2.13)-(2.15) для сплава АЖ5К10, модифицированного стронцием были использованы интегралы от удельной теплоемкости по уравнению (2.10). Результаты расчета температурной зависимости изменений энтальпии, энтропии и энергии Гиббса для сплава АЖ5К10 со стронцием по уравнениям (2.13)-(2.15) через 100К представлены на рисунках 2.7-2.9.



Рисунок 2.7 – Температурная зависимость изменений энтальпии алюминиевого сплава АЖ5К10 со стронцием и эталона Си



**Рисунок 2.8** – Температурная зависимость изменений энтропии для сплава АЖ5К10, модифицированного стронцием и эталона Си



**Рисунок 2.9** – Температурная зависимость изменений энергии Гиббса для сплава АЖ5К10 со стронцием и эталона Си

Получены полиномы температурной зависимости теплоёмкости и изменений энтальпии, энтропии и энергии Гиббса для алюминиевого сплава АЖ5К10 со стронцием. Коэффициент корреляции их изменения составляет  $R^2_{\text{корр}} = 1,0000 \div 0,9747$ . С увеличением температуры теплоёмкость, энтальпия и энтропия алюминиевого сплава АЖ5К10 со стронцием увеличиваются, а значения величины энергия Гиббса уменьшаются. Добавки стронция снижают теплоемкость исходного сплава АЖ5К10, уменьшают энтальпию и энтропию, увеличивают значения энергии Гиббса.

### 2.4. Теплоемкость и изменение термодинамических функций сплава АЖ5К10, модифицированного барием

Графики температуры охлаждения изучаемых образцов из сплавов от времени представлены на рисунке 2.10. Процесс охлаждения для всех образцов достаточно близок друг к другу и температуры идентично уменьшаются. При охлаждении на кривых для образцов из сплава АЖ5К10, модифицированного барием, не обнаружены термические остановки, связанные с фазовым переходом или превращением.



Рисунок 2.10 – Зависимость температуры образцов от времени охлаждения (т) для образцов из сплава АЖ5К10, модифицированного барием и эталона Cu (а) и в интервале 200-600К (б)

Кривые скорости охлаждения сплавов от температуры представлены на рисунке 2.11. Обработкой их установлены экспериментальные значения коэффициентов *a*, *b*, *p*, *k*, *ab*, *pk* уравнения (2.9), которые приведены в таблице 2.9. Расчет скорости охлаждения образцов проводился по уравнению (2.10).



**Рисунок 2.11** – Температурная зависимость скорости охлаждения образцов из сплава АЖ5К10, модифицированного барием и эталона Си

Для определения удельной теплоемкости сплава АЖ5К10 с кальцием использовали формулу (2.8). Были получены полиномы температурной зависимости удельной теплоемкости сплава АЖ5К10, модифицированного барием и эталона (Си марки М00) по уравнением (2.11).

Значения коэффициентов уравнений (2.11) представлены в таблице 2.10. В таблице 2.11 приведены результаты расчета температурной зависимости удельной теплоемкости сплава АЖ5К10, модифицированного барием и эталона Си через 100К. Видно, что в исследованном температурном

интервале с ростом температуры теплоемкость сплава АЖ5К10 с барием растёт, а от содержания бария уменьшается.

**Таблица 2.9** – Значения коэффициентов *a*, *b*, *p*, *k*, *ab*, *pk* в уравнении (2.9) для сплава АЖ5К10, модифицированного барием

Содержание		$b.10^{-3}$		$k \cdot 10^{-5}$	a.b	$nk \cdot 10^{-2}$
Ва в сплаве,	<i>a</i> , K	<i>v</i> 10 ,	<i>p</i> , K	κ 10 ,	u v, $V \cdot e^{-1}$	$p \kappa 10$ , $\mathbf{V} \cdot e^{-1}$
мас.%		C		C	КC	КC
АЖ5К10(1)	488,5697	6,64	309,4336	5,30	3,25	1,64
(1)+0,05%Ba	493,5779	6,98	316,3000	5,94	3,45	1,88
(1)+0,1%Ba	493,2063	6,79	326,5295	6,64	3,35	2,17
(1)+0,5%Ba	495,8501	6,74	326,0076	6,55	3,34	2,14
(1)+1,0%Ba	485,6564	7,10	315,2493	5,72	3,45	1,80

**Таблица 2.10** – Значения коэффициентов *a*, *b*, *c*, *d* уравнений (2.11) для сплава АЖ5К10, модифицированного барием

Содержание	a	$h \cdot 10^{-2}$	$c \cdot 10^{-5}$	$d \cdot 10^{-8}$	Коэффициент
Ва в сплаве,		$U = 10^{\circ}$ , $\Pi_{\rm M} / \mu_{\rm E} = 1/2^{\circ}$	$U_{10}$ , $U_{3}$	$\pi$ 10,	корреляции,
мас.%	Дж∕кі∙к	Дж∕кі∙к	Дж∕кі∙к	Дж/кі∙к	<i>R</i> , %
АЖ5К10(1)	-4,0493	2,95	-5,3	3,13	0,957
(1)+0,05%Ba	-4,2393	3,02	-5,4	3,14	0,9563
(1)+0,1%Ba	-4,3336	3,03	-5,3	3,06	0,9643
(1)+0,5%Ba	-4,2590	2,96	-5,2	2,96	0,9639
(1)+1,0%Ba	-4,4495	3,15	-5,7	3,33	0,9533

Используя вычисленные значения теплоемкости сплава АЖ5К10, модифицированного барием и экспериментально полученные величины скорости охлаждения образцов, нами был рассчитан коэффициент теплоотдачи (*a*, Bт/К·м<sup>2</sup>) для сплава АЖ5К10 с барием и эталона Си по следующей формуле (2.12). Температурная зависимость коэффициента

теплоотдачи для алюминиевого сплава АЖ5К10, модифицированного барием представлена на рисунке 2.12.

**Таблица 2.11** – Температурная зависимость удельной теплоемкости алюминиевого сплава АЖ5К10, модифицированного барием

Содержание		Т, К							
Ва в сплаве, мас.%	300	400	500	600	700	800	<b>C<sup>0</sup></b> <sub>p</sub> , %		
АЖ5К10(1)	0,8488	1,2259	1,2882	1,2235	1,2196	1,4643	72,51		
(1)+0,05%Ba	0,8159	1,2177	1,2931	1,2305	1,2183	1,4449	77,10		
(1)+0,1%Ba	0,7766	1,2008	1,2914	1,2320	1,2062	1,3976	79,96		
(1)+0,5%Ba	0,7492	1,1714	1,2660	1,2106	1,1828	1,3602	81,55		
(1)+1,0%Ba	0,7582	1,1573	1,2176	1,1389	1,1210	1,3637	79,86		
Рост С <sub>р</sub> , %	-10,67	-5,60	-5,48	-6,91	-8,08	-6,87			



Рисунок 2.12 – Температурная зависимость коэффициента теплоотдачи алюминиевого сплава АЖ5К10, модифицированного барием и эталона Си

Результаты расчета температурной зависимости изменений энтальпии, энтропии и энергии Гиббса для сплава АЖ5К10 с барием и эталона Си по уравнениям (2.13)-(2.15) через 100К представлены в таблице 2.12.

**Таблица 2.12** – Температурная зависимость изменений термодинамических функций сплава АЖ5К10, модифицированного барием

Содержание		$[H^0(T)$	$(-H^0(T_0^*)],$	кДж/кг для	і сплавов				
Ва в сплаве, мас.%	300 K	400 K	500 K	600 K	700 K	800 K			
АЖ5К10(1)	1,560	108,701	236,247	362,108	482,973	614,314			
(1)+0,05%Ba	1,485	105,930	232,665	358,470	478,965	608,610			
(1)+0,1%Ba	1,425	103,840	230,465	357,120	477,985	605,600			
(1)+0,5%Ba	1,375	100,875	224,735	349,075	467,775	592,475			
(1)+1,0%Ba	1,429	102,900	225,676	345,867	459,563	582,834			
$[S^{0}(T) - S^{0}(T_{0}^{*})], \ \kappa Дж/кг \cdot K$ для сплавов									
АЖ5К10(1)	0,005	0,311	0,595	0,825	1,011	1,186			
(1)+0,05%Ba	0,005	0,303	0,585	0,815	1,000	1,173			
(1)+0,1%Ba	0,005	0,296	0,579	0,810	0,996	1,166			
(1)+0,5%Ba	0,005	0,288	0,564	0,791	0,974	1,140			
(1)+1,0%Ba	0,005	0,294	0,568	0,787	0,962	1,127			
	$[G^0$	$(T) - G^0(T_0^*)$	)], кДж/кг Д	цля сплаво	В				
АЖ5К10(1)	-0,005	-15,635	-61,352	-132,806	-224,857	-334,655			
(1)+0,05%Ba	-0,005	-15,135	-59,913	-130,354	-221,372	-330,005			
(1)+0,1%Ba	-0,004	-14,746	-58,861	-128,726	-219,296	-327,395			
(1)+0,5%Ba	-0,004	-14,295	-57,227	-125,395	-213,901	-319,588			
(1)+1,0%Ba	-0,004	-14,675	-58,154	-126,346	-214,067	-318,430			

 $T_0 = 298,15$  K.

Рост теплоемкости исследованных сплавов от температуры объясняется вышеуказанным фактором. Уменьшение теплоемкости сплава АЖ5К10 при модифицировании его барием можно объяснить степенью модифицирующего действия в исходном сплаве, структурными изменениями в результате модифицирования и их влиянием на колебательные процессы, происходящие в кристаллической решетке сплавов при их нагреве.

#### 2.5. Заключение к главе 2

Теплофизические и термодинамические функции (энтальпия, энтропия, энергия Гиббса) сплавов являются важнейшими физическими характеристиками, определяющими закономерности поведения данных сплавов, при различных внешних отсутствуют как для алюминиевого сплава АЖ5К10, модифицированного кальцием, стронцием и барием, так и для более сложных по составу сплавов. Ниже приводятся сравнительные для ЩЗМ значения теплоемкости и изменения термодинамических функций сплава АЖ5К10.

**Таблица 2.13** – Зависимость удельной теплоёмкости сплава АЖ5К10 с 1.0мас.%, модифицированного щелочноземельными металлами

Содержание	Т, К					Рост	
ЩЗМ в	200	400	500	600	700	800	$C_P^0$ ,
сплаве, мас.%	300	400 500	000	700	800	%	
АЖ5К10(1)	0.849	1.226	1.288	1.224	1.220	1.464	72.51
(1)+1.0%Ca	0.773	1.175	1.236	1.158	1.143	1.393	90.10
(1)+1.0%Sr	0.758	1.170	1.242	1.171	1.154	1.138	83.32
(1)+1.0%Ba	0.758	1.153	1.218	1.139	1.121	1.364	79.86

Результаты исследования теплофизических и термодинамических свойств алюминиевого сплава АЖ5К10, модифицированного кальцием, стронцием и барием, обобщены в таблицах 2.13-2.14 для сплава,

содержащего 1.0 мас.% четвёртого компонента. Видно, что от температуры наблюдается рост теплоемкости (таблица 2.12), и при переходе от сплавов с кальцием к сплавам со стронцием и барием теплоемкость незначительно уменьшается.

**Таблица 2.14** – Температурная зависимость изменений термодинамический функций для сплава АЖ5К10 с ЩЗМ

Содержание	$[H^{0}(T) - H^{0}(T_{0}^{*})],$ кДж/кг для сплавов					
ЩЗМ в сплаве, мас.%	300 K	400 K	500 K	600 K	700 K	800 K
АЖ5К10(1)	1.560	108.701	236.247	362.108	482.973	614.314
(1)+1.0%Ca	1.420	102.541	225.106	345.107	458.753	582.474
(1)+1.0%Sr	1.391	101.455	224.084	345.108	460.098	584.362
(1)+1.0%Ba	1.429	102.900	225.676	345.867	459.563	582.834
[S <sup>0</sup> (T) – S <sup>0</sup> (T <sub>0</sub> <sup>*</sup> )], кДж/кг·К для сплавов						
АЖ5К10(1)	0.005	0.311	0.595	0.825	1.011	1.186
(1)+1.0%Ca	0,005	0.293	0.566	0.785	0.960	1.125
(1)+1.0%Sr	0.005	0.290	0.563	0.784	0.961	1.127
(1)+1.0%Ba	0.005	0.294	0.568	0.789	0.962	1.127
$[G^{0}(T) - G^{0}(T_{0}^{*})],$ кДж/кг для сплавов						
АЖ5К10(1)	-0.005	-15.635	-61.352	-132.806	-224,857	-334,655
(1)+1.0%Ca	-0.004	-14.610	-59.959	-125.979	-213,505	-317,695
(1)+1.0% Sr	-0.004	-14.413	-57.425	-125.218	-212,725	-317,050
(1)+1.0%Ba	-0.004	-14.675	-58.154	-126.346	-214,067	-318,430

В целом тепловые характеристики и изменения термодинамических функций алюминиевого сплава АЖ5К10 с элементами подгруппы кальция показали их повышение с ростом температуры, а значение энергии Гиббса уменьшается по мере перехода от сплавов с кальцием к сплавам с барием.

### ГЛАВА З. ИЗУЧЕНИЕ КИНЕТИКИ ПРОЦЕССА ОКИСЛЕНИЯ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АЖ5К10 С КАЛЬЦИЕМ, СТРОНЦИЕМ И БАРИЕМ, В ТВЕРДОМ СОСТОЯНИИ

#### 3.1. Методика изучения кинетики окисления сплавов

Метод термогравиметрии просторно принимается для исследования кинетики окисления твердых и жидких металлов, описанных в работах [38, 65-68]. Именно этим методом можно получить достоверные и детальные результаты.

Кинетика процесса окисления проводилась по методикам, описанным в работах [69-79]. Схема установки показана на рисунке 3.1. Основные части установки состоят из печи Таммана 1, пружиной из молибденовой проволоки 12 и катетометра КМ-8 осуществляется фиксация изменения веса образца. На независимой от печи установке 13 укреплялась пружина в чехол (для исключения вибрации и сотрясения).

Термопара из платинородиевой проволоки измерена при помощи температуры. Температура с точностью ±2 °С регистрировалась с помощью потенциометра ПП-63. Погрешность эксперимента определяется по уравнению:

$$K = \frac{\left(g \mid S\right)^2}{t},\tag{3.1}$$

где: g-вес металла, S-поверхность, t-время.

Для расчета относительной ошибки эксперимента находили сумму относительных ошибок:

$$\frac{\Delta K}{K} = \frac{\Delta g}{g} = \frac{\left(\Delta S\right)^2}{s} + \frac{\Delta t}{t}$$
(3.2)

Для выражения по уравнению (3.2) каждое слагаемое рассматривается отдельно. Точность взвешивания определяем по формуле:

$$\Delta g / g = (2.71)^2 + (1.5)^2 + 0.027 = 9.61$$
(3.3)



Рисунок 3.1 – Схема установки для изучения кинетики окисления металлов и сплавов: 1-печь Таммана; 2-чехол из оксида алюминия; 3-газопроводящая трубка; 4-тигель; 5-термопара; 6-платиновая нить; 7-водоохлаждаемая крышка; 8-потенциометр; 9-вода; 10-катетометр; 11-чехол из молибденового стекла; 12-пружина из молибденовой проволоки; 13-подставка; 14-крышка; 15-трон и холодильник [77-79].

## **3.2.** Кинетика окисления алюминиевого сплава АЖ5К10, модифицированного кальцием, в твердом состоянии [10-А]

Изучено влияние добавок кальция на окисление алюминиевого сплава АЖ5К10. Содержание кальция в сплаве составляло 0.01-1.0 мас.%. С точностью 0,1·10<sup>-6</sup> кг на аналитических весах АРВ-200 были взвешены шихты. Эксперименты проведены при температурах 773, 823 и 873 К в атмосфере воздуха. Результаты исследования обобщены в таблицах 3.1, 3.2 и на рисунках 3.2- 3.7.

**Таблица 3.1** – Кинетические и энергетические параметры процесса окисления алюминиевого сплава АЖ5К10 с кальцием, в твердом состоянии

Содержание	Температура	Истинная скорость	Кажущаяся энергия
Са в сплаве,	окисления, К	окисления К·10 <sup>-4</sup> ,	активации,
мас.%		кг <sup>•</sup> м <sup>-2</sup> •с <sup>-1</sup>	кДж/моль
	773	1.42	
0.0	823	1.61	178.0
	873	1.76	
	773	1.72	
0.01	823	1.92	170.3
	873	2.10	
	773	1.90	
0.05	823	2.13	159.7
	873	2.32	
	773	2.07	
0.1	823	2.40	142.2
	873	2.56	
	773	2.28	
0.5	823	2.64	136.5
	873	2.79	
	773	2.54	
1.0	823	2.91	120.8
	873	3.01	

Модифицирование сплава АЖ5К10 до 1,0 мас.% кальция согласно расчету значений энергии активации окисления данных сплавов показало, что скорость окисления повышается, а энергия активации уменьшается от 178,0 до 120,8 кДж/моль (таблица 3.1).



Рисунок 3.2 – Кинетические кривые окисления алюминиевого сплава АЖ5К10 (а), содержащего 0.01 мас.% (б) кальция, в твердом состоянии

Если сравнить скорости окисления сплавов при одинаковых температурных, то можно увидеть, что у алюминиевого сплава АЖ5К10, содержащего 0.01, 0.05, 0.1, 0.5 и 1.0 мас.% кальция, скорость окисления больше по сравнению с исходным сплавом.



**Рисунок 3.3** – Кинетические кривые окисления сплава АЖ5К10 с кальцием, мас.% 0,05 (а), 0,1 (б) в твердом состоянии



**Рисунок 3.4** – Кинетические кривые окисления сплава АЖ5К10 с кальцием, мас.%: 0,5 (а); 1,0 (б) в твердом состоянии

Для алюминиевого сплава АЖ5К10, например с содержанием 1.0 % кальция, скорость окисления изменяется при указанных температурах 773,

823, 873 К от 2,54 до 3,01·10<sup>-4</sup> кг<sup>·м-2</sup>·с<sup>-1</sup>, а значение энергии активации окисления данных сплавов различного состава, например, для сплава АЖ5К10 с 1,0 мас.% кальцием, составляет 120.8 кДж/моль (таблица 3.1).



Рисунок 3.5 – Квадратичные кинетические кривые окисления алюминиевого сплава АЖ5К10 (а), содержащего 0.01 мас.% (б) кальция, в твердом состоянии

Повышение скорости окисления образцов из сплавов наблюдается с повышением температуры, то есть окисление сплавов по-разному протекает (рисунок 3.2-3.4) и интенсивно растет, но через 20 минут становится ближе к нулю.



**Рисунок 3.6** – Квадратичные кинетические кривые окисления сплава АЖ5К10 с содержанием кальция, мас.% 0,05(а) и 0,1(б), в твердом состоянии

На рисунках 3.5-3.7 в координатах (g/s)<sup>2</sup>-t представлены кинетические кривые процесса окисления для алюминиевого сплава АЖ5К10 с кальцием, которые показывают о гиперболическом механизме окисления.



**Рисунок 3.7** – Квадратичные кинетические кривые окисления сплава АЖ5К10 с содержанием кальция, мас.% 0,5(а) и 1,0(б), в твердом состоянии

В таблице 3.2 приведены полученные математической обработкой полиномы квадратичных кривых процесса окисления сплавов системы A % 5 K 10 - Ca. Полученные уравнения свидетельствуют о гиперболическом механизме процесса окисления исследованных сплавов, о чём свидетельствует значение n в уравнении  $y=x^n$ , которое составляет  $n=2\div3$ .

**Таблица 3.2** – Результаты математической обработки квадратичных кинетических кривых окисления алюминиевого сплава АЖ5К10 с кальцием, в твердом состоянии

Содержание кальция в сплаве, мас.%	Температура окисления, К	Полиномы кривых окисления сплавов	Коэффициент корреляции R,%
	773	$y = 0,3 \cdot 10^{-5}x^{4} + 0,000x^{3} - 0,054x^{2} + 1,420x$	0,988
0.0	823	$y = 0,001x^3 - 0,062x^2 + 1,609x$	0,991
	873	$y = 0,3 \cdot 10^{-5} x^4 + 0,000 x^3 - 0,059 x^2 + 1,736 x$	0,996
	773	$y = -0, 1 \cdot 10^{-5} x^4 + 0,001 x^3 - 0,064 x^2 + 1,379 x$	0,984
0.01	823	$y = 0,001x^3 - 0,063x^2 + 1,509x$	0,992
	873	$y = 0,001x^3 - 0,064x^2 + 1,646x$	0,997
	773	$y = 0,001x^3 - 0,061x^2 + 1,328x$	0,992
0.05	823	$y = 0,000x^3 - 0,058x^2 + 1,755x$	0,990
	873	$y = 0,000x^3 - 0,059x^2 + 1,565x$	0,996
	773	$y = 0,001x^3 - 0,060x^2 + 1,324x$	0,994
0.1	823	$y = 0,001x^3 - 0,060x^2 + 1,574x$	0,995
	873	$y = 0,000x^3 - 0,061x^2 + 1,755x$	0,993
	773	$y = 0,001x^3 - 0,060x^2 + 1,347x$	0,990
0.5	823	$y = 0,001x^3 - 0,065x^2 + 1,575x$	0,992
	873	$y = 0,000x^3 - 0,062x^2 + 1,765x$	0,995
	773	$y = 0,001x^3 - 0,057x^2 + 1,367x$	0,993
1.0	823	$y = 0,001x^3 - 0,065x^2 + 1,582x$	0,995
	873	$y = 0,001x^3 - 0,057x^2 + 1,367x$	0,993

Из рисунка 3.8 представлены изохроны окисления сплавов за 10, 20 минут окисления при интервале температур 773(а) и 873(б) К. Установлено, что с увеличением содержания кальция в исходном сплаве привес растёт.



**Рисунок 3.8** – Изохронны окисления алюминиевого сплава АЖ5К10 с кальцием при температурах 773 (а) и 873 (б) К

Зависимость lgK-1/Т (рисунок 3.9) приведена для алюминиевого сплава АЖ5К10 с добавками кальция. Скорость окисления данного сплава, содержащего 1.0 % кальция, максимальна и равна 3.01·10<sup>-4</sup> кг·м<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>. Другие составы по сравнению с этим сплавом имеют меньшее значение скорости окисления.



Рисунок 3.9 – Зависимость lgK от 1/Т для сплава АЖ5К10(1) с кальцием, мас.% 0,01(2); 0,05(3); 0,1(4); 0,5(5); 1,0(6)

#### 3.3. Влияние стронция на кинетику окисления алюминиевого сплава АЖ5К10, в твердом состоянии

Для исследования синтеза сплавы с различным содержанием стронция в количестве от 0,01 до 1,0 мас.% представлены в таблице 3.3. С использованием формулы K=g/s· $\Delta$ t рассчитана истинная кривая скорости окисления от температуры. Рассчитанные значения энергии активации окисления для исследованных сплавов приведены в таблице 3.3.

Кинетические процессы окисления сплавов системы АЖ5К10-Sr, вид которых напоминает ветвь гиперболы, приведены на рисунках 3.10-3.13. Данными проведена их математическая обработка и соответствующие уравнения зависимостей. Прибыли массы образцов из сплавов (g/s)<sup>2</sup> от

времени (t), которые говорят о непараболическом характере процесса окисления, представлены на рисунке 3.12-3.13 и в таблице 3.4. В сплаве АЖ5К10 со стронцием характерно увеличение высоты уровня (рисунок 3.10-3.13).

**Таблица 3.3** – Кинетические параметры и энергетические показатели процесса окисления сплава АЖ5К10 со стронцием, в твердом состоянии

Cononina Sr -	Танинаталина	Истинная скорость	Кажущаяся энергия
Содержание SI в		окисления К <sup>.</sup> 10 <sup>-4</sup> ,	активации,
сплаве, мас.%	окисления, К	кг <sup>•</sup> м <sup>-2</sup> •с <sup>-1</sup>	кДж/моль
	773	1.42	
0.0	823	1.61	178,0
	873	1.76	
	773	1.81	
0.01	823	2.02	161,7
	873	2.20	
	773	2.02	
0.05	823	2.23	149,8
	873	2.41	
	773	2.19	
0.1	823	2.51	134,4
	873	2.63	
	773	2.42	
0.5	823	2.77	123,2
	873	2.94	
	773	2.70	
1.0	823	3.01	110,0
	873	3.16	



**Рисунок 3.10** – Кинетические кривые окисления сплава АЖ5К10 со стронцием, мас.% 0,01(а) и 0,05(б), в твердом состоянии

В таблице 3.3 показано, что с увеличением содержания стронция в сплавах от температуры скорость окисления повышается, о чем свидетельствуют изохроны окисления сплавов системы АЖ5К10-Sr при температурах 773 (а) и 873 (б) К (рисунок 3.14).



**Рисунок 3.11** – Кинетические кривые окисления сплава АЖ5К10 со стронцием, мас.% 0,1(а), 0,5(б) и 1,0(в), в твердом состоянии

**Таблица 3.4** – Данные математической обработки квадратичных кинетических кривых окисления алюминиевого сплава АЖ5К10 со стронцием, в твердом состоянии

Содержание	Температура		Коэффициент
стронция в	окисления,	полиномы кривых окисления	корреляции
сплаве, мас.%	К	сплавов	R,%
	773	$y = 0,3 \cdot 10^{-5} x^4 + 0,000 x^3 - 0,054 x^2 + 1,420 x$	0,988
0,0	823	$y = 0,001x^3 - 0,062x^2 + 1,609x$	0,991
	873	$y = 0,3 \cdot 10^{-5} x^4 + 0,000 x^3 - 0,059 x^2 + 1,736 x$	0,996
	773	$y = 0, 2 \cdot 10^{-6} x^4 + 0,001 x^3 - 0,058 x^2 + 1,332 x$	0,985
0,01	823	$y = 0.5 \cdot 10^{-5} x^4 + 0.000 x^3 - 0.047 x^2 + 1.478 x$	0,988
	873	$y = 0,000x^3 - 0,049x^2 + 1,696x$	0,994
	773	$y = 0,000x^3 - 0,051x^2 + 1,473x$	0,987
0,05	823	$y = 0,000x^3 - 0,054x^2 + 1,619x$	0,989
	873	$y = 0,000x^3 - 0,055x^2 + 1,746x$	0,995
	773	$y = 0,000x^3 - 0,052x^2 + 1,256x$	0,991
0,1	823	$y = 0,000x^3 - 0,053x^2 + 1,477x$	0,990
	873	$y = 0,000x^3 - 0,054x^2 + 1,673x$	0,993
	773	$y = 0,000x^3 - 0,043x^2 + 1,323x$	0,987
0,5	823	$y = 0,000x^3 - 0,035x^2 + 1,403x$	0,992
	873	$y = 0,000x^3 - 0,027x^2 + 1,508x$	0,996
	773	$y = 0,000x^3 - 0,053x^2 + 1,396x$	0,985
1,0	823	$y = 0,000x^3 - 0,059x^2 + 1,577x$	0,986
	873	$y = 0,000x^3 - 0,055x^2 + 1,694x$	0,996

С повышением содержания стронция в сплавах (таблица 3.3) увеличивается скорость окисления алюминиевого сплава АЖ5К10. Процесс окисления сплавов протекает по различным механизмам.


Рисунок 3.12 – Квадратичные кривые окисления алюминиевого сплава АЖ5К10, содержащего стронций, мас.%: 0.01 (а) и 0.05 (б), в твердом состоянии

Зависимость lgK-1/Т для сплава АЖ5К10, модифицированного стронцием (рисунок 3.15), имеет прямолинейный характер. Подобные кривые модифицированных сплавов находятся выше кривой для алюминиевого сплава АЖ5К10.



**Рисунок 3.13** – Квадратичные кривые окисления сплава АЖ5К10 содержащего стронций, мас.%: 0.1 (а); 0.5 (б); 1.0 (в), в твердом состоянии



**Рисунок 3.14** – Изохронны окисления алюминиевого сплава АЖ5К10, модифицированного стронцием при температурах 773 (а) и 873 (б) К



Рисунок 3.15 – Зависимость lgk-1/Т для сплава АЖ5К10(1) со стронцием, мас.%: 0.01(2); 0.05 (3); 0.1 (4); 0.5 (5); 1.0 (6)

Проведенные исследования показали, что окисление сплавов системы АЖ5К10-Sr относится к гиперболическому закону. Выявлено, что добавки стронция в исходном сплаве при небольших количествах добавки обладают наименьшим значением скорости процесса окисления.

### 3.4. Высокотемпературное окисление алюминиевого сплава АЖ5К10, модифицированного барием, в твердом состоянии

Окисление сплава АЖ5К10 с барием (рисунки 3.16-3.21, таблицы 3.5, 3.6) изучено по методике, описанной в разделе 3.1.

Однако при обработке кривых окисления с помощью программы MS Excel в квадратичном виде на рисунках 3.18, 3.19 установлено, что процесс окисления соответствует уравнению гиперболы, которые представлены в таблице 3.6. **Таблица 3.5** – Кинетические параметры и энергетические показатели реакции окисления сплава АЖ5К10 с барием, в твердом состоянии

Содержание Sr в сплаве, мас.%	Температура окисления, К	Истинная скорость окисления К·10 <sup>-4</sup> , кг <sup>·</sup> м <sup>-2</sup> ·с <sup>-1</sup>	Кажущаяся энергия активации, кДж/моль
	773	1,42	
0,0	823	1,61	178,0
	873	1,76	
	773	2,10	
0,01	823	2,24	147,5
	873	2,49	
	773	2,40	
0,05	823	2,58	131,3
	873	2,80	
	773	2,65	
0,1	823	2,86	118,8
	873	3,07	
	773	2,84	
0,5	823	3,10	109,1
	873	3,26	
	773	3,08	
1,0	823	3,33	98,5
	873	3,54	

Величина энергия активации сплава АЖ5К10, содержащего 1,0 мас.% Ва, изменяется от 178,0 до 98,6 кДж/моль при окислении. Квадратичные кривые окисления сплавов в общем описываются уравнением

$$y = \kappa \cdot x^n$$

где: у-привес образцов сплавов, х-продолжительность процесса окисления, для которых значение n изменяется 2 до 6.



**Рисунок 3.16** – Кривые процесса окисления алюминиевого сплава АЖ5К10, содержащего барий, мас.%: 0.01 (а); 0.05 (б), в твердом состоянии

Изохроны процесса окисления (рисунок 3.20) и зависимость lgK от 1/Т (рисунок 3.21) приведены для алюминиевого сплава АЖ5К10 с добавками бария. Итак, термогравиметрическим методом в атмосфере кислорода воздуха изучены кривые окисления сплавов системы АЖ5К10-Ва. При количествах от 0,01 до 1,0 мас.% бария скорость процесса окисления сплава АЖ5К10 повышается.



**Рисунок 3.17** – Кинетические кривые процесса окисления алюминиевого сплава АЖ5К10, содержащего барий, мас.%: 0.1 (а); 0.5 (б); 1.0 (в), в твердом состоянии



**Рисунок 3.18** – Квадратичные кривые окисления алюминиевого сплава АЖ5К10, содержащего барий, мас.%: 0.01 (а); 0.05 (б), в твердом состоянии



**Рисунок 3.19** – Квадратичные кривые окисления алюминиевого сплава АЖ5К10, содержащего барий, мас.%: 0.1 (а); 0.5 (б); 1.0 (в), в твердом состоянии



**Рисунок 3.20** – Изохронны окисления алюминиевого сплава АЖ5К10, модифицированного барием при температурах 773 (а) и 873 (б) К

**Таблица 3.6** – Результаты математической обработки кинетических кривых окисления сплава АЖ5К10 с барием, в твердом состоянии

Содержание	Температура		Коэффициент
стронция в	окисления,	полиномы кривых окисления	корреляции
сплаве, мас.%	К	Сплавов	R,%
	773	$y = 0,3 \cdot 10^{-5} x^4 + 0,000 x^3 - 0,054 x^2 + 1,420 x$	0,988
0.0	823	$y = 0,001x^3 - 0,062x^2 + 1,609x$	0,991
	873	$y = 0,3 \cdot 10^{-5} x^{4} + 0,000 x^{3} - 0,059 x^{2} + 1,736 x$	0,996
	773	$y = 0,001x^3 - 0,055x^2 + 1,265x$	0,995
0.01	823	$y = 0,001x^3 - 0,063x^2 + 1,557x$	0,993
	873	$y = 0,001x^3 - 0,068x^2 + 1,762x$	0,997
	773	$y = 0,001x^3 - 0,053x^2 + 1,195x$	0,996
0.05	823	$y = 0,000x^3 - 0,054x^2 + 1,445x$	0,996
	873	$y = 0,000x^3 - 0,052x^2 + 1,608x$	0,996
	773	$y = 0,000x^3 - 0,048x^2 + 1,327x$	0,990
0.1	823	$y = 0,000x^3 - 0,053x^2 + 1,483x$	0,993
	873	$y = 0,000x^3 - 0,058x^2 + 1,651x$	0,997
	773	$y = 0,000x^3 - 0,049x^2 + 1,200x$	0,993
0.5	823	$y = 0,000x^3 - 0,050x^2 + 1,443x$	0,993
	873	$y = 0,000x^3 - 0,047x^2 + 1,618x$	0,995
	773	$y = 0,000x^3 - 0,053x^2 + 1,305x$	0,992
1.0	823	$y = 0,000x^3 - 0,056x^2 + 1,522x$	0,992
	873	$y = 0,000x^3 - 0,041x^2 + 1,563x$	0,997



Рисунок 3.21 – Зависимость lgk-1/Т для сплава АЖ5К10(1) с барием, мас.%: 0.01(2); 0.05 (3); 0.1 (4); 0.5 (5); 1.0 (6)

#### 3.5. Заключение к главе 3

Процесс окисления исследуемых сплавов определяется согласно процессам диффузии отдельных компонентов в составе оксидной плёнки. При окислении вероятно обогащение слоёв различного оксида, где наблюдаются диффундирующие компоненты. Следовательно, это изменяет протекание процесса окисления. В данном случае модифицирующие компоненты из щелочноземельных металлов и их оксиды, непременно входя в состав оксида алюминия, сильно облегчают процессы диффузии ионов Al, где ускоряется процесс окисления. Значения энергии активации при окислении сплава АЖ5К10 с кальцием, стронцием и барием различной концентрации приведены в таблице 3.7. Видно, что величина эффективной энергии активации по мере перехода от кальциевых сплавов к бариевым устойчивость сплавам уменьшается, вместе С ЭТИМ сплавов К высокотемпературному окислению падает. Это в целом коррелируется со свойствами кальция, стронция и бария, у которых в пределах подгруппы химическая активность характеризуется их ростом.

**Таблица 3.7** – Сравнительное значение эффективной энергии активации с процесса окисления сплава АЖ5К10 с кальцием, стронцием и барием

Содержание	Кажущаяся энергия активации, кДж/моль								
ЩЗМ в	Добавка, мас.%								
сплаве, мас.%	0,0	0,01	0,05	0,1	0,5	1,0			
Кальций	178,0	170,3	159,7	142,2	136,5	120,8			
Стронций	178,0	161,8	149,9	134,5	123,3	110,1			
Барий	178,0	147,5	131,3	118,8	109,1	98,5			

## ГЛАВА 4. ПОТЕНЦИОДИНАМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АНОДНОГО ПОВЕДЕНИЯ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АЖ5К10, МОДИФИЦИРОВАННОГО КАЛЬЦИЕМ, СТРОНЦИЕМ И БАРИЕМ, В СРЕДЕ ЭЛЕКТРОЛИТА NaCl

## 4.1. Материалы и методики исследования анодных свойств алюминиевого сплава АЖ5К10 с кальцием, стронцием и барием [21-А]

Образцы сплавов для исследования использовали размером стержня 140Х8 мм. Изолировалась нерабочая часть сплавов смолой смесью 50% парафина и 50% канифоли. Торец электрода служил рабочей поверхностью. Торцевую часть рабочего электрода после очищения погружали в электролиты 0.03%; 0.3% и 3.0%-ного хлорида натрия.

Потенциодинамические исследования образцов сплавов проводили по методике, описанной в работах [80-93]. Электрохимические параметры сплавов определяли из анодных поляризационных кривых (рисунок 4.1).



Рисунок 4.1 – Полная поляризационная (2 мВ/с) диаграмма сплава АЖ5К10 в среде электролита 3.0%-ного NaCl

Потенциал питтингообразования (- $E_{n.o.}$ ), потенциал коррозии (- $E_{kop.}$ ) и ток коррозии (- $i_{kop.}$ ), определялся графически из анодной кривой. Данный потенциал определяется также как точка пересечения обратного и прямого хода. Расчет тока коррозии как основной коррозионно-электрохимической характеристики проводился по катодной кривой с участием тафеловской наклонной  $\beta_k=0,12$  В.

Скорость коррозии *К* определялся по току коррозии ( $-i_{kop.}$ ) по формуле:  $K = i_{kop.} \cdot k$ , где k = 0,335 г/А·ч для алюминия [94-100].

# 4.2. Влияние добавок кальция на коррозионно-электрохимическое поведение алюминиевого сплава АЖ5К10,

### в среде электролита NaCl [3-А, 16-А, 18-А, 20-А]

В настоящем разделе приведены результаты исследования анодного поведения алюминиевого сплава АЖ5К10 состава Al+5%Fe+10Si, модифицированного кальцием, в количестве от 0,01 до 1,0 мас.%, в среде электролита NaCl. В таблице 4.1 и на рисунке 4.2 представлено модифицирование кальцием, что способствует смещению потенциала свободной коррозии (-Е<sub>св.кор.</sub>) исходного алюминиевого сплава АЖ5К10 в область положительных значений.

В таблице 4.1 представлены коррозионно-электрохимические характеристики алюминиевого сплава АЖ5К10 с кальцием в среде электролита NaCl различной концентрации. Как видно, с ростом содержания кальция в пределах 0,01-1,0 мас.% в исходном сплаве АЖ5К10 и уменьшения концентрации хлорид-иона. Потенциалы питтингообразования, коррозии и репассивации смещаются в положительную область значений. Это сопровождается уменьшением скорости коррозии исходного сплава почти 2 раза, результаты представлены на рисунках 4.3 и 4.4.

Анодные ветви потенциостатических кривых для исследованных электродов с различным содержанием кальция приведены на рисунке 4.5., потенциалы приведены относительно хлоридсеребяного электрода (х.с.э.).



**Рисунок 4.2** – Временная зависимость потенциала (х.с.э.) свободной коррозии (-Е<sub>св.кор.</sub>, В) сплава АЖ5К10 (1), содержащего кальций, мас.%: 0.01(2), 0.05(3), 0.1(4), 0.5(5), 1(6), в среде электролита: 0.03%(а), 0.3%(б) и 3.0%-ного(в) NaCl

**Таблица 4.1** – Коррозионно-электрохимические характеристики алюминиевого сплава АЖ5К10 с кальцием, в среде электролита NaCl

		Эл	ектрохи	Скорость			
Электролита	Содержание	ПОТ	енциаль	.э.)	коррозии		
NaCl, мас.		Б	Б	Б	Б	K·10 <sup>3</sup>	Ікор.·10 <sup>2</sup>
	MaC. 70	- <b>С</b> <sub>св.кор.</sub>	$\mathcal{L}_{\text{CB.KOP.}}$ - $\mathcal{L}_{\text{KOP.}}$ - $\mathcal{L}_{\Pi}$	- <b>ட</b> <sub>Π.0.</sub>	- <b>ட</b> <sub>р.п.</sub>	г/м <sup>2</sup> ·час	A/m <sup>2</sup>
	-	0,750	0,994	0,645	0,738	3,7	12,39
	0.01	0,620	0,952	0,530	0,536	3,4	11,39
0.02	0.05	0,680	0,940	0,516	0,528	3,0	10,05
0,05	0.1	0,595	0,928	0,500	0,520	2,7	9,04
	0.5	0,584	0,916	0,488	0,506	2,4	8,04
	1.0	0,576	0,904	0,476	0,486	2,1	7,03
	-	0,950	1,060	0,660	0,780	4,6	15,42
	0.01	0,776	0,968	0,588	0,672	3,8	12,73
0.2	0.05	0,767	0,956	0,572	0,666	3,4	11,30
0.5	0.1	0,760	0,942	0,558	0,654	3,0	10,05
	0.5	0,750	0,930	0,542	0,644	2,7	9,04
	1.0	0.742	0,920	0,530	0,622	2,4	8,04
	-	1,000	1,110	0,700	0,900	5,8	19,43
	0.01	0,832	1,000	0,600	0,720	5,2	17,42
2.0	0.05	0,820	0,988	0,586	0,714	4,8	16,08
5.0	0.1	0,808	0,974	0,578	0,702	4,5	15,07
	0.5	0,796	0,960	0,566	0,688	4,2	14,07
	1.0	0,788	0,946	0,552	0,670	4,0	13,40

Изучением коррозионно-электрохимического поведения алюминиевого сплава АЖ5К10, модифицированного кальцием, в среде электролита NaCl показано, что добавки кальция до 1,0 мас.% независимо от состава электролита уменьшают скорость коррозии исходного сплава (рисунок 4.3). Также исследованием влияния хлорид-иона на электрохимические характеристики алюминиевого сплава АЖ5К10, модифицированного кальцием, установлено, что снижение его концентрации 1,5-20 раза способствует уменьшению скорости коррозии сплавов и сдвигу электродных потенциалов в положительную область (рисунок 4.4).



Рисунок 4.3 – Зависимость скорости коррозии сплава АЖ5К10 от концентрации кальция, в среде электролита 0,03% (1); 0,3% (2) и 3,0% (3) NaCl



**Рисунок 4.4** – Зависимость плотности тока коррозии сплава АЖ5К10 (1), содержащего кальций, мас.%: 0.01 (2); 0.05 (3); 0.1 (4); 0.5 (5) и 1 (6), от концентрации



**Рисунок 4.5** – Анодные ветви потенциодинамических (2 мВ/с) кривых алюминиевого сплава АЖ5К10(1), содержащего кальций, мас.% 0,01(2); 0,05(3); 0,1(4); 0,5(5), 1,0(6), в среде электролита 0,03% (а) и 3,0%-ного NaCl



Рисунок 4.6 – Микроструктуры сплава АЖ5К10 с кальцием

На рисунке 4.6 представлена микроструктура алюминиевого сплава АЖ5к10 с кальцием при увеличении 10Х и 20Х, где Х=100. Видно, что модифицирование значительно измельчает включение двойных эвтектик α+A1-Si, α-A1-A1<sub>3</sub>Fe и тройной эвтектики α-A1+Si+FeSiA1<sub>5</sub> (рисунок 4.6б). Более высокое содержание кальция (0.5 мас.%) (рисунок 4.6в) не обеспечивает оптимальное измельчение микроструктуры алюминиевого сплава АЖ5К10.

# 4.3. Анодное поведение сплава АЖ5К10, модифицированного стронцием, в среде электролита NaCl [6-A, 19-A]

Результаты исследования анодного поведения сплава АЖ5К10, модифицированного стронцием, приведены в таблице 4.2 и на рисунке 4.7.

Видно, что модифицирование стронцием способствует смещению потенциала свободной коррозии исходного алюминиевого сплава АЖ5К10 в положительную область значений. Данная тенденция имеет место во всех трёх изученных средах электролита NaCl. Чем больше добавки стронция, тем положительнее потенциал свободной коррозии.

Электрохимические потенциалы питтингообразования и репассивации характеризуются тенденциями смешения в положительную область значений (таблица 4.2). При этом рост концентрации хлорид-иона способствует повышению скорости коррозии сплавов (рисунки 4.8, 4.9).

Вышеуказанные положительные изменения анодных характеристик сплава АЖ5К10 под воздействием добавок стронция объясняются его модифицирующим влиянием на микроструктуру исходного сплава (рисунок 4.10).

Анодные ветви потенциодинамических кривых сплавов системы АЖ5К10-Sr представлены на рисунке 4.10. Кривые, относящиеся к сплавам, модифицированным стронцием, располагаются левее кривых исходного алюминиевого сплава АЖ5К10, что свидетельствует об уменьшении скорости коррозии.



**Рисунок 4.7** – Временная зависимость потенциала (х.с.э.) коррозии (-Е<sub>св.кор.</sub>, В) сплава АЖ5К10 (1), содержащего стронций, мас.%: 0.01(2), 0.05(3), 0.1(4), 0.5(5), 1(6), в среде электролита: 0.03%(а), 0.3%(б) и 3.0%-ного(в) NaCl

Таблица	4.2	—	Коррозионно-электрохимические	характеристики
алюминиев	ого спл	тава <i>А</i>	АЖ5К10 со стронцием, в среде электр	юлита NaCl

	C	Эл	ектрохи	Скорость			
Электролита NaCl, мас.	Содержание	ПОТ	енциаль	.э.)	коррозии		
		Б	Б	Б	Б	K·10 <sup>3</sup>	Ікор.·10 <sup>2</sup>
	Ma <b>C.</b> %	-С <sub>св.кор.</sub> -1	- <b>ட</b> <sub>кор.</sub>	-L <sub>Π.0.</sub>	- Ср.п.	г/м <sup>2</sup> ·час	$A/M^2$
	-	0,750	0,994	0,645	0,738	3,7	12,39
	0.01	0,618	0,958	0,486	0,518	3,5	11,72
0.02	0.05	0,606	0,946	0,478	0,507	3,3	11,05
0,05	0.1	0,594	0,934	0,468	0,499	3,0	10,05
	0.5	0,580	0,920	0,456	0,482	2,8	9,38
	1.0	0,570	0,908	0,444	0,464	2,6	8,71
	-	0,950	1,060	0,660	0,780	4,6	15,42
	0.01	0,764	0,984	0,558	0,640	4,4	14,74
0.2	0.05	0,758	0,978	0,544	0,632	4,2	14,07
0.3	0.1	0,752	0,962	0,532	0,620	3,9	13,06
	0.5	0,746	0,946	0,524	0,610	3,7	12,39
	1.0	0,738	0,932	0,512	0,588	3,4	11,30
	-	1,000	1,110	0,700	0,900	5,8	19,43
	0.01	0,830	1,008	0,620	0,696	5,6	18,76
2.0	0.05	0,816	0,996	0,606	0,690	5,3	17,76
5.0	0.1	0,804	0,980	0,592	0,680	5,0	16,75
	0.5	0,792	0,968	0,584	0,666	4,8	16,08
	1.0	0,784	0,952	0,572	0,646	4,6	15,41

Как известно, модификацией двойной и тройной эвтектик в структуре сплава АЖ5К10 можно значительно изменить как механические свойства, так и коррозионную стойкость алюминиевого сплава АЖ5К10, модифицированного стронцием, что позволило на 60-70% повысить его коррозионную устойчивость (таблица 4.2), что объясняется его модифицированием кальцием (рисунок 4.11).



Рисунок 4.8 – Зависимость скорости коррозии сплава АЖ5К10 от концентрации стронция, в среде электролита 0,03% (1); 0,3% (2) и 3,0% (3) NaCl



**Рисунок 4.9** – Зависимость плотности тока коррозии сплава АЖ5К10 (1), содержащего стронций, мас.%: 0.01 (2); 0.05 (3); 0.1 (4); 0.5 (5) и 1 (6), от концентрации NaCl



**Рисунок 4.10** – Анодные ветви потенциодинамических (2 мВ/с) кривых алюминиевого сплава АЖ5К10(1), содержащего стронций, мас.% 0,01(2); 0,05(3); 0,1(4); 0,5(5), 1,0(6), в среде электролита 0,03%(а) и 3,0%-ного NaCl



Рисунок 4.11 – Микроструктуры сплава АЖ5К10 со стронцием

Определено, что в среде электролита 3,0%-ного NaCl потенциал свободной коррозии сплава АЖ5К10, модифицированного стронцием, колеблется 1,0-0,784 В (таблица 4.2), что в паре с железом (стали), потенциал

которого 0,440 В, вполне может обеспечить надёжную защиту стальных конструкций, т.к. разница потенциала составляет от 0,350 до 0,560 В.

# 4.4. Электрохимическая коррозия сплава АЖ5К10, модифицированного барием, в среде электролита NaCl [4-A, 15-A, 17-A]

Для исследования был выбран образец сплава АЖ5К10 следующего состава: 5%-железа, 10%-кремния, остальное - алюминия. Последний подвергался модифицированию барием в количестве 0,01-1,0 мас.%.

**Таблица 4.3** – Коррозионно-электрохимические характеристики алюминиевого сплава АЖ5К10 с барием, в середе электролита NaCl

		Эл	ектрохи	Скорость			
Электролита	Содержание	ПОТ	енциаль	коррозии			
NaCl, мас.	мас %	-E	-Е <sub>кор.</sub>	-Е <sub>п.о.</sub>	-Е <sub>р.п.</sub>	K·10 <sup>3</sup>	Ікор.·10 <sup>2</sup>
		⊷св.кор.				г/м <sup>2</sup> ·час	$A/M^2$
	-	0,750	0,994	0,645	0,738	3,7	12,39
	0.01	0,614	0,960	0,500	0,508	3,6	12,06
0.03	0.05	0,602	0,948	0,488	0,502	3,4	11,39
0,03	0.1	0,588	0,934	0,476	0,492	3,1	10,38
	0.5	0,575	0,922	0,462	0,478	2,7	9,04
	1.0	0,564	0,910	0,450	0,458	2,5	8,37
	-	0,950	1,060	0,660	0,780	4,6	15,42
	0.01	0,760	0,976	0,564	0,628	4,2	14,07
0.3	0.05	0,752	0,964	0,550	0,620	3,9	13,06
0.5	0.1	0,746	0,950	0,538	0,608	3,7	12,39
	0.5	0,738	0,936	0,526	0,598	3,4	11,30
	1.0	0,732	0,918	0,514	0,576	3,1	10,38
	-	1,000	1,110	0,700	0,900	5,8	19,43
	0.01	0,824	0,996	0,586	0,682	5,5	18,42
3.0	0.05	0,812	0,984	0,572	0,672	5,3	17,75
	0.1	0,800	0,970	0,560	0,664	5,1	17,08
	0.5	0,788	0,958	0,548	0,648	4,8	16,08
	1.0	0,780	0,946	0,534	0,630	4,5	15,07



**Рисунок 4.12** – Временная зависимость потенциала (х.с.э.) свободной коррозии (–Е<sub>св.кор.</sub>, В) сплава АЖ5К10 (1), содержащего барий, мас.%: 0.01(2), 0.05(3), 0.1(4), 0.5(5), 1(6), в среде электролита: 0,03% (а); 0,3% (б) и 3% - ного (в) NaCl

С ростом содержания хлорид-иона -Е<sub>св.кор.</sub>, -Екор., -Еп.о. и -Ер.п. сплавов смещается в направлении отрицательных потенциалов (таблица 4.3, рисунок 4.12), что связано с ухудшением защитных свойств защитной плёнки на поверхности образцов. Характеристики потенциала питтингообразования согласно результатам исследования, приведены в таблице 4.3.



**Рисунок 4.13** – Зависимость скорости коррозии сплава АЖ5К10 от концентрации бария, в среде 0,03% (1); 0,3% (2) и 3,0% (3) электролита NaCl



**Рисунок 4.14** – Зависимость плотности тока коррозии сплава АЖ5К10 (1), содержащего барий, мас.%: 0.01 (2); 0.05 (3); 0.1 (4); 0.5 (5) и 1 (6), от концентрации NaCl

Возникновение питтинговой коррозии сильно зависит от природы ионов (хлорид-иона) и их концентрации. При переходе от электролита 0,03%-ного к 3,0%-ному NaCl и росте концентрации бария в сплаве АЖ5К10 отмечено уменьшение скорости его коррозии во всех исследованных средах (рисунки 4.13- 4.15).



Рисунок 4.15 – Микроструктуры сплава АЖ5К10 с барием



**Рисунок 4.16** – Анодные ветви потенциодинамических (2 мВ/с) кривых алюминиевого сплава АЖ5К10(1), содержащего барий, мас.% 0,01(2); 0,05(3); 0,1(4); 0,5(5), 1,0(6), в среде электролита 0,03%(а) и 3,0%-ного NaCl

Электрохимические потенциалы в среде NaCl смешаются в область отрицательных значений, и скорость коррозии сплавов растёт. Всё это сопровождается сдвигом в область положительных значений анодной ветви потенциодинамических кривых модифицированных барием сплавов (рисунок 4.16).

### **4.5.** Заключение к главе 4 [5-А, 7-А, 8-А, 14-А]

Представленные в таблицах 4.4 и 4.5 результаты электрохимического исследования алюминиевого сплава АЖ5К10 с кальцием, стронцием и барием показывают, что потенциал свободной коррозии сплавов с ростом концентрации кальция, стронция и бария изменяется в положительном направлении оси ординат. С ростом концентрации хлорид-иона потенциал свободной коррозии алюминиевого сплава АЖ5К10 уменьшается от -0,750 В в среде электролита 0,03%-ного NaCl до -1,000 В, в среде электролита 3,0%-ного NaCl (таблица 4.4).

Подобная зависимость характерна также для АЖ5К10, сплава модифицированного Независимо щелочноземельными металлами. ОТ содержания модифицирующего компонента и концентрации раствора NaCl наблюдается уменьшение величины потенциала свободной коррозии. Величины электрохимических потенциалов сплава АЖ5К10 с кальцием, стронцием и барием в электролите NaCl изменяются в положительном направлении оси ординат. Рост концентрации кальция, стронция и бария способствует увеличению величины электрохимических потенциалов в изученных средах. Подобное поведение характерно для алюминиевого сплава АЖ5К10, модифицированного кальцием, стронцием и барием. По мере перехода от исходного сплава АЖ5К10 к сплавам с элементами подгруппы кальция электрохимические потенциалы уменьшаются. При этом величины потенциалов изменяются в положительном направлении оси ординат, результаты представлены в таблице 4.4.

**Таблица 4.4** – Потенциалы (х.с.э.) свободной коррозии (–Е<sub>св.кор.</sub>, В) и питтингообразования (–Е<sub>п.о.</sub>, В) сплавов систем АЖ5К10-Са (Sr, Ba), в среде электролита NaCl

	Содержание	Сплавы с Са		Сплавы со Sr		Сплавы с Ва	
Среда	ЩЗМ в сплаве,						
Среда NaCl	мас.%	-Есв.кор.	-Еп.о.	-Есв.кор.	-Еп.о.	-Есв.кор.	-Еп.о.
,	-	0.750	0.645	0.750	0.645	0.750	0.645
Mac. 70	0.01	0.621	0.530	0.618	0.486	0.614	0.500
0.02	0.05	0.608	0.516	0.606	0.478	0.602	0.488
0.05	0.1	0.595	0.500	0.594	0.468	0.588	0.476
	0.5	0.584	0.488	0.580	0.456	0.575	0.462
	1.0	0.576	0.476	0.570	0.444	0.564	0.450
	-	0.950	0.660	0.950	0.660	0.950	0.660
0.3	0.01	0.776	0.588	0.764	0.558	0.760	0.564
	0.05	0.767	0.572	0.758	0.544	0.752	0.550
	0.1	0.760	0.558	0.752	0.532	0.746	0.538
	0.5	0.750	0.542	0.746	0.524	0.738	0.526
	1.0	0.742	0.530	0.738	0.512	0.732	0.514
	-	1,000	0.700	1,000	0.700	1,000	0.700
	0.01	0.832	0.600	0.830	0.620	0.824	0.586
2.0	0.05	0.820	0.586	0.816	0.606	0.812	0.572
3.0	0.1	0.808	0.578	0.804	0.592	0.800	0.560
	0.5	0.796	0.566	0.792	0.584	0.788	0.548
	1.0	0.788	0.552	0.784	0.572	0.780	0.534

Для алюминиевого сплава АЖ5К10 характерно увеличение скорости коррозии согласно росту концентрации хлорид-иона, которая представлена в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Зависимость скорости коррозии сплавов систем АЖ5К10-Са (Sr, Ba), в среде электролита NaCl

	Садарианиа	Скорость коррозии							
	Содержание	сплавов с Са		сплаво	в со Sr	сплавов с Ва			
Среда	щом в	$i_{\text{кор.}} \cdot 10^{-2}$	K · 10 <sup>-3</sup>	$i_{\text{кор.}} \cdot 10^{-2}$	K · 10 <sup>-3</sup>	$i_{\text{кор.}} \cdot 10^{-2}$	K · 10 <sup>-3</sup>		
NaCl,	CHIMABC, Mac. 70	$A/m^2$	г/м <sup>2</sup> ·час	$A/M^2$	г/м <sup>2</sup> ·час	$A/m^2$	г/м <sup>2</sup> ·час		
мас.%	-	12,39	3,7	12,39	3,7	12,39	3,7		
	0.01	11,39	3,4	11,72	3,5	12,06	3,6		
0.02	0.05	10,05	3,0	11,05	3,3	11,39	3,4		
0.05	0.1	9,04	2,7	10,05	3,0	10,38	3,1		
	0.5	8,04	2,4	9,38	2,8	9,04	2,7		
	1.0	7,03	2,1	8,71	2,6	8,37	2,5		
	-	15,42	4,6	15,42	4,6	15,42	4,6		
	0.01	12,73	3,8	14,74	4,4	14,07	4,2		
0.3	0.05	11,30	3,4	14,07	4,2	13,06	3,9		
0.5	0.1	10,05	3,0	13,06	3,9	12,39	3,7		
	0.5	9,04	2,7	12,39	3,7	11,30	3,4		
	1.0	8,04	2,4	11,30	3,4	10,38	3,1		
	-	19,43	5,8	19,43	5,8	19,43	5,8		
	0.01	17,42	5,2	18,76	5,6	18,42	5,5		
3.0	0.05	16,08	4,8	17,76	5,3	17,75	5,3		
5.0	0.1	15,07	4,5	16,75	5,0	17,08	5,1		
	0.5	14,07	4,2	16,08	4,8	16,08	4,8		
	1.0	13,40	4,0	15,41	4,6	15,07	4,5		

Кальций, стронций и барий, проявляя сильное модифицирующее действие, эффективно измельчают микроструктуру всех фаз, составляющих основу сплавов. Измельчение микроструктуры сплавов положительно влияет на их коррозионную стойкость. Из таблицы 4.5 видно, что наименьшая

скорость коррозии характерна для алюминиевого сплава АЖ5К10 с кальцием.

Представленные на рисунке 4.17 анодные ветви потенциодинамических кривых алюминиевого сплава АЖ5К10 с элементами подгруппы кальция показывают, что модифицированные сплавы располагаются в область левее кривой исходного сплава АЖ5К10 во всех исследованных средах.

250 500 при увеличениях крат Микроструктуры сплавов И представлены на рисунке 4.18. Видно, что добавки кальция и стронция значительно измельчают микроструктуру исходного сплава АЖ5К10, т.е. происходит модификация не только двойной эвтектики  $\alpha$ -Al-Si,  $\alpha$ -Al-Al<sub>3</sub>Fe и тройной эвтектики  $\alpha$ -Al+Si+FeSiAl<sub>5</sub>, но также изменяется характер (форма) кристаллизации тройных интерметаллидов  $Fe_2SiAl_8$  ( $\alpha$ ),  $FeSiAl_5$  ( $\beta$ ). Изучение микроструктур исходного сплава АЖ5К10 и сплава, модифицированного барием, показывает его слабый модифицирующий эффект по сравнению с кальцием и стронцием. Видно, что барий также эффективно измельчает микроструктуру эвтектик, но слабо действует на характер кристаллизации тройных интерметаллидов.

Существенная роль отводится к действующим факторам, определяющим благоприятное структурообразование силуминов, и методам модифицирования, где модифицирование позволяет измельчать структуры сплавов.

Нами в качестве модификатора структуры сплава АЖ5К10 выбраны щелочноземельные металлы, эффект модифицирования которых ранее нами был установлен на примере промышленных силуминов [101-104]. особенно Щелочноземельные металлы, стронций И барий, надёжно важнейших обеспечивают измельчение структурных составляющих силуминов-алюминиево-кремниевой эвтектики. Как видно из рисунка 4.18, щелочноземельные металлы не только измельчают микроструктуру

алюминиево-кремниевой эвтектики, но также благотворно влияют на характер кристаллизации тройных фаз состава  $Fe_2SiAl_8(\alpha)$  и  $FeSiAl_5(\beta)$ .





Рисунок 4.17 – Анодные ветви потенциодинамических (2 мВ/с) кривых алюминиевого сплава АЖ5К10(1), содержащего кальций (а), стронций (б) и барий (в), мас. %: 0.01 (2); 0.05 (3); 0.1 (4); 0.5 (5); 1.0 (6), в среде электролита 0.3 %-ного NaCl.

Нами в качестве модификатора структуры алюминиевого сплава АЖ5К10 выбраны щелочноземельные металлы, эффект так как модифицирования указан в работах [105, 106]. Щелочноземельные металлы надёжно обеспечивают процесс измельчения структурных составляющих силуминов-алюминиево-кремниевой эвтектики. Как видно из рисунка 4.18, шелочноземельные металлы не только измельчают микроструктуру алюминиево-кремниевой эвтектики, но также благотворно влияют на характер кристаллизации тройных фаз состава  $Fe_2SiAl_8$  ( $\alpha$ ) и  $FeSiAl_5$  ( $\beta$ ). Механизм влияния щелочноземельных металлов на модифицирование микроструктуры сплава АЖ5К10 объясняется их поверхностно-активным действием. Являясь поверхностно-активными металлами, ЩЗМ изменяют межфазное натяжение на границе расплава с зародышами и скорость обмена атомов между ними, что препятствуют либо способствуют образованию кристаллизующейся фазы.


модифицированного щелочноземельными металлами

Модифицирование сплавов способствует сильному изменению анодных характеристик процесса коррозии сплавов в среде электролита NaCl. При ЭТОМ происходит смещение область В положительную свободной потенциалов коррозии И питтингообразования, что сопровождается уменьшением скорости анодной коррозии исходного сплава АЖ5К10 примерно на 50-80%. Сплав АЖ5К10 является модельным сплавом и при дальнейшем его легировании магнием, титаном и другими металлами можно существенно улучшить его эксплуатационные свойства.

## выводы

## Основные научные результаты исследования:

1. В режиме «охлаждения» исследована температурная зависимость теплоемкости алюминиевого сплава АЖ5К10, модифицированного кальцием, стронцием и барием. Показано, что с ростом концентрации модифицирующего компонента и температуры теплоемкость сплавов увеличивается. При переходе от сплавов с кальцием к сплавам со стронцием и барием величина теплоемкости и коэффициента теплоотдачи сплавов уменьшается [1-А, 2-А, 9-А, 11-А, 12-А, 13-А].

2. Исследованиями температурных зависимостей изменений термодинамических функций алюминиевого сплава АЖ5К10 с элементами подгруппы кальция показано, что при переходе от сплавов с кальцием к сплавам со стронцием и барием величины энтальпии и энтропии уменьшаются. С ростом температуры энтальпия и энтропия сплавов растут, значение энергии Гиббса уменьшается [1-A, 2-A, 9-A, 11-A, 12-A, 13-A].

3. Методом термогравиметрии исследована кинетика окисления алюминиевого сплава АЖ5К10, модифицированного кальцием, стронцием и барием. Установлено, что окисление сплавов описывается гиперболой уравнения с истинной скоростью окисления порядка 10<sup>-4</sup>, кг·м<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>. Выявлено, что самые минимальные значения скорости окисления относятся к сплаву АЖ5К10 с кальцием, а максимальные к сплавам со стронцием [10-А].

4. Установлено, что фазовый состав продуктов окисления определяется активностью металла, входящего в состав сплава, который играет основную роль в формировании на поверхности образцов сплава оксидной пленки. Доминирующей фазой в продуктах окисления сплавов является оксид алюминия [10-А].

5. Потенциостатическим методом в потенциодинамическом режиме со скоростью развертки потенциала 2мВ/с исследовано анодное поведение сплава АЖ5К10, модифицированного кальцием, стронцием и барием. Показано, что добавки модифицирующего компонента в пределах 0.01-1.0

мас.% на 50-80% повышают коррозионную стойкость исходного сплава АЖ5К10 в среде электролита NaCl [3-A, 4-A, 5-A, 6-A, 14-A, 15-A, 16-A, 17-A, 18-A, 19-A, 20-A, 21-A].

6. Изучением коррозионно-электрохимического поведения сплава АЖ5К10 с кальцием, стронцием и барием в среде электролита NaCl показано, что добавки модифицирующих элементов независимо от состава электролита уменьшают скорость коррозии исходного сплава. Также исследованием влияния хлорид-иона на электрохимические характеристики сплава АЖ5К10 с кальцием, стронцием и барием показано, что снижение его концентрации в 10 и 100 раз способствует уменьшению скорости коррозии сплавов в два раза и сдвигу электродных потенциалов в более положительную область [3-А, 4-А, 5-А, 6-А, 14-А, 15-А, 16-А, 17-А, 18-А, 19-А, 20-А, 21-А].

7. На основании выполненных исследований разработаны составы новых сплавов, которые защищены двумя малыми патентами Республики Таджикистан. Сплавы в качестве анодов предлагаются для защиты от коррозии стальных конструкций и сооружений [7-А, 8-А].

## Рекомендации по практическому использованию результатов:

1. Установленные физико-химические параметры сплава АЖ5К10, модифицированного кальцием, стронцием и барием рекомендуются для пополнения страниц соответствующих справочников.

2. Разработанные сплавы и способы их получения рекомендуется для использования предприятиям промышленности подведомственные Министерству промышленности и новых технологий Республики Таджикистан.

3. Опытные партии новых сплавов могут производиться на базе Государственного научного учреждения Центр исследования инновационных технологий при Национальной академии наук Таджикистана с целью поставки заинтересованным предприятиям и ведомствам.

## ЛИТЕРАТУРА

## Список использованной литературы:

[1]. Белецкий, В.М. Алюминиевые сплавы (Состав, свойства, технология, применение) / В.М. Белецкий, Г.А. Кривов. -К.: Комитех, 2005. - 365 с.

[2]. Луц, А.Р. Алюминий и его сплавы / А.Р. Луц, А.А. Суслина. -Самара: Самарского государственного технического университета, 2013. -81с.

[3]. Умарова, Т.М. Коррозия двойных алюминиевых сплавов в нейтральных средах / Т.М. Умарова, И.Н. Ганиев. -Душанбе: Дониш, 2007. 258с.

[4]. Дриц, М.Е. Алюминиевые сплавы. Свойства, обработка применение / М.Е. Дриц. -М.: Металлургия, 1979. -679 с.

[5]. Chen, X.G. Growth mechanisms of intermetallic phases in DC cast AA1XXX alloys / X.G. Chen // Essential Readings in Light Metals. Cast Shop for Aluminum Production. -2013, -Vol. 3. -P. 460-465.

[6]. Grange, D.A. Microstructure control in ingots of aluminium alloys with an emphasis on grain refinement / D.A. Grange // Essential Readings in Light Metals. Cast Shop for Aluminum Production. -2013, -Vol. 3. -P. 354-365.

[7]. Geoffrey, K.S. Fundamentals of Solidification in Aluminum Castings /
K.S. Geoffrey // International Journal of Metalcasting. -2014. -Vol. 8. -Iss. 1. -P. 7-20.

[8]. Бергман, Г.А. Термодинамические свойства индивидуальных веществ / Г.А. Бергман, И.В. Вейц, В.А. Медведов, Г.А. Хачкурузов, В.С. Юнгман. -М.: Наука, 1981 -472 с.

[9]. Дриц, М.Е. Свойства элементов. Справочник под редакцией Дрица М.Е. / М.Е. Дриц, П.Б. Будберг, Г.С. Бурханов, А.М. Дриц, В.М. Пановко. - М.: Металлургия, 1981 -672 с.

[10]. Hultgpen, P. Selected values of the thermodynamic properties of the elements / P. Hultgpen, All Ohio. Metals park, 1973 -342 p.

[11]. Pathak, P.D. Debye temperatures of silver and aluminium of high temperatures some new correlations / P.D. Pathak, N.P. Shah // Phys. Stat. Sol. Data -1979. -V. 55. -No. 2. -P. 159-162.

[12]. Ho, C.Y. Thermal conductivity of the elements a comprehensive revert / C.Y. Ho, R.W. Powell, P.E. Liley // J. Phys. Chem. Rev. Data. -1974. -V. 3. -No. 1. P. 21.

[13]. Kammer, E.W. The elastic constant for single crystals bismuth and tin from temperature to the melting point / E.W. Kammer, L.C. Cardinal, C.V. Vold, M.E. Glicksman // J. Phys. Chem. Sol. Data. -1972. -V. 33. -P. 1891-1898.

[14]. Thermal properties of matter, V.10. Thermal diffusivity ed by Toulokian. Plenum, 1973. -649 p.

[15]. Desal, P.D. Electrical resistivity of aluminium and manganese / P.D. Desal, H.M. James, C.Y. Ho // J. Phys. Chem. Ref. Data. -1984. -V. 13. -No. 4. -P. 1131-1172.

[16]. Глазукова, С.Г. Свойства элементов. Справочник под редакцией / С.Г. Глазукова. -М.: Металлургия, 1980. -446 с.

[17]. Desal, D.J. Termodynamic properties of iron and silicon / D.J. Desal //J. Appl. Phys. Chem. Ref. Data. -1986. -V. 15. No. 3. -P. 967-983.

[18]. Новикова, С.И. Теплое расширение твердых тел / С.И. Новикова. -М.: Наука, 1974. -291 с.

[19]. Gurvich, L.V. Thermodynamic properties of Inorganic Substances /
 L.V. Gurvich, I.V. Veyts, C.B. Alcock // Washington-Philadelphia. Hemisphere
 Publ. Corp. -1990. -V.2. -P. 569.

[20]. Глазов, В.М. Теплофизические свойства (теплоёмкость и термическое расширение) монокристаллического кремния / В.М. Глазов, А.С. Пашинкин // ТВТ. -2001. -Т 39. -№ 3. -С. 443-449.

[21]. Глазов, В.М. Аномальное изменение теплоёмкости при нагревании монокристаллов кремния в связи с протеканием структурных превращений / В.М. Глазов, А.С. Пашинкин, М.С. Михайлова, Г.Г. Тимошина // Докл. РАН. 1997. -Т. 334. -№ 1. -С. 59.

[22]. Глазов, В.М. Изменение характеристик прочности межатомной связи и характера температурной зависимости теплоёмкости при легировании кремния ниобием / В.М. Глазов, М.С. Михайлова // Докл. РАН. - 1998. -Т. 360. -№ 2. -С. 209.

[23]. Глазов, В.М. Характеристики межатомной связи и температурная зависимость теплоёмкости кремния, легированного ниобием / В.М. Глазов, М.С. Михайлова // ЖФХ. -1998. -Т. 72. -№ 11. -С. 1931.

[24]. Танков, Е.Ю. Фазовые диаграммы элементов при высоком давлении / Е.Ю. Танков. -М.: Наука, 1979. -192 с.

25. Охотина, А.С. Теплопроводность твёрдых тел: справочник / Под ред. А.С. Охотина.- М.: Энергоатомиздат, 1984.- 321 с.

[26]. Дриц, М.Е. Свойства элементов: справочник / М.Е. Дриц. -М.: Металлургия, 1987. -540 с.

[27]. Белорусов, Н.И. Электрические кабели, провода и шнуры: справочник / Н.И. Белорусов, Л.Е. Саакян, А.И. Яковлев. -М.: Энергия, 1979. -С. 20-21.

[28]. Mitchell, M.H. Electrical resistivity of beryllium / M.H. Mitchell // J. Appl. Phys. Chem. Ref. Data. 1979. -V. 8 -P. 439-497.

[29]. Вахобов, А.В. Металлургия кальция и его сплавов / А.В. Вахобов, И.Н. Ганиев, Х.М. Назаров. -Душанбе: Дониш, 2000. -178 с.

[30]. Зиновьев, В.Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах. Справочник / В.Е. Зиновьев. -М.: Металлургия, 1989. -384 с.

[31]. Шпильрайн, Э.Э. Теплоемкость магния в твердой и жидкой фазах
/ Э.Э. Шпильрайн, Д.Н. Каган, Т.П. Садыков, С.Н. Ульянов // ТВТ. -1984. -Т.
22. -№ 3. -С. 619-621.

[32]. Максименко, В.И. Исследование кинетики окисления алюминиевых сплавов в жидком состоянии / В.И. Максименко, М.И. Максименко // Новое в технологии металлургических процессов. - Красноярск. СО АН СССР. -1973. -С. 15-20.

[33]. Чистяков, Ю.Д. Электронографическое изучение процессов окисления алюминиевых сплавов / Ю.Д. Чистяков, М.В. Мальцев // Кристаллография. -1957. -Т. 2. -Вып. 5. -С. 628-633.

[34]. Ганиев, И.Н. Коррозия двойных сплавов алюминия с элементами периодической системы / И.Н. Ганиев, Т.М. Умарова, З.Р. Обидов. - Германия: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. -208 с.

[35]. Липенских, Б.М. Окисление жидких металлов и сплавов / Б.М. Липенских, А.А. Киташев, А.А. Белоусов. -М: Наука, 1979. -116 с.

[36]. Олимов, Н.С. Окисление алюминиевых сплавов с кремнием, германием и оловом: Автореф. дис... канд. хим. наук: 02.00.04-Физическая химия / Олимов Насруддин Солихович. -Душанбе, 1994. -26 с.

[37]. Ганиев, И.Н. Исследование процесса окисления расплавов Al-Si кислородом воздуха / И.Н. Ганиев, Н.С. Олимов, Б.Б. Эшов // Известия РАН Металлы. -2000. -№ 2. -С. 129-133.

[38]. Ганиев, И.Н. Синтез, физико-химические свойства и применение алюминиевых сплавов с редкоземельными и щелочноземельными металлами: диссертация доктора химических наук: 02.00.01-Неорганическая химия / Инт химии им. В. И. Никитина Акад. наук Таджикской ССР. -Душанбе, 1991. - 540 с.

[39]. Джураева, Л.Т. Высокотемпературное окисление сплавов системы алюминий-стронций из твёрдого состояния / Л.Т. Джураева, И.Н. Ганиев, А.В. Вахобов // Изв. АН Тадж. СССР. Отдел физ.-матем., хим. и геол. Наук. - 1985. -№ 4. -С. 76-78.

[40]. Джураева, Л.Т. Окисление алюминиево-бариевых сплавов в неизотермических условиях / Л.Т. Джураева, И.Н. Ганиев // Доклады АН Тадж. СССР, 1988. -№11, -С.728-730.

[41]. Маджидов, Х. Теплоемкость особо чистого алюминия в зависимости от температуры / Х. Маджидов, Б. Аминов, М. Сафаров и др. // ДАН ТаджССР. -1990. -Т. 33. -№ 6. -С. 380-383.

[42]. Мондольфо, Л.Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов / Л.Ф. Мондольфо. -М.: «Металлургия», 1979. -640 с.

[43]. Красноярский, В.В. Коррозионно-электрохимические свойства сплавов алюминия с железом в нейтральных растворах / В.В. Красноярский, Н.Р. Сайдалиев // Э.И. Защита от коррозии и окружающей среды. -1991. - Вып. 3. -С. 14-19.

[44]. Красноярский, В.В. Коррозионно-электрохимическое поведение сплавов алюминия с кремнием / В.В. Красноярский, Н.Р. Сайдалиев, Л.С. Гузей // Э.И. Защита от коррозии и охрана окружающей среды. -1993. -Вып. 8. -С. 1-7.

[45]. Ганиев, И.Н. Влияние pH среды на анодные поляризационные характеристики сплавов системы Al-Sr / И.Н. Ганиев, М.Ш. Шукроев // Изв. АН Тадж. ССР. Отд. Физ-мат, хим. и геол. наук. -1986. -№ 1. -С. 79-81.

[46]. Ганиев, И.Н. Коррозия алюминиевых сплавов с кальцием, стронцием и барием в морской воде / И.Н. Ганиев, В.В. Красноярский, Т.И. Жукова // ЖПХ. -1995. -Т. 68. -№ 7. -С. 1146-1149.

[47]. Stanford, N. Effect of microalloying with rare-earth elements on the texture of extruded magnesium-based alloys / N. Stanford, D. Atwell, A. Beer, C. Daviesc, M.R. Barnett // Scripta Mater. -2008. -Vol. 59. -No. 7. -P. 772–775.

[48]. Иброхимов, Н.Ф. Физикохимия сплава АМг2 с редкоземельными металлами / Н.Ф. Иброхимов, И.Н. Ганиев, Х.О. Одинаев. -Душанбе, Таджикский технический университет им. акад. М.С. Осими, 2016. -153 с.

[49]. Старк, Б.В. Явления нагрева в муфельных печах / Б.В. Старк // Журн. русского металлургического оборудования. -1926. -№. 2. -С. 184-198.

[50]. Иванцов, Г.П. Нагрев металла (теория и методы расчёта) / Г.П. Иванцов. Свердловск-Москва: Государ. научно-техн. изд-во литературы по черной и цветной металлургии, 1948. -191 с.

[51]. Багницкий, В.Е. Обратные связи в физических явлениях. (Продолжение книги Новая физика электронных приборов) / В.Е. Багницкий -Германия: Изд. дом LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. -196 с. [52]. Умаров, М.А. Температурная зависимость теплоемкости и изменение термодинамических функций свинца марки С2 / М.А. Умаров, И.Н. Ганиев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. -2018. -Т. 20. -№ 1. -С. 23-29.

[53]. Ганиев, И.Н. Температурная зависимость теплоемкости и изменение термодинамических функций сплава АЖ 4.5 с оловом / И.Н. Ганиев, А.Г. Сафаров, Ф.Р. Одинаев, У.Ш. Якубов, К. Кабутов // Изв. ВУЗов. Цветная металлургия. -2019. -№ 1. -С. 50-58.

[54]. Ниёзов, О.Х. Температурная зависимость теплоемкости и изменение термодинамических функций свинцового сплава ССуЗ с кальцием / О.Х. Ниёзов, И.Н. Ганиев, А.Г. Сафаров, Н.М. Муллоева, У.Ш. Якубов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Металлургия». - 2019. -Т. 19. -№ 3. -С. 33-43.

[55]. Ганиев, И.Н.. Температурная зависимость теплоемкости и изменений термодинамических функций сплава АЖ 4.5 с висмутом / И.Н. Ганиев, А.Г. Сафаров, Ф.Р. Одинаев, У.Ш. Якубов, К. Кабутов // Металлы. - 2019. -№ 1. -С. 21-29.

[56]. Азимов, Х.Х. Влияние лития на теплоёмкость и изменение термодинамических функций алюминиевого сплава АЖ2,18 / Х.Х. Азимов, И.Н. Ганиев, И.Т. Амонов, Н.Ф. Иброхимов // Вестник Магнитогорского государственного тонического университета им. Г.И. Носова. -2018. -Т. 16. - № 1. -С. 37-44.

[57]. Зокиров, Ф.Ш. Температурная зависимость теплоемкости и термодинамических функций сплава АК12М2, модифицированного стронцием / Ф.Ш. Зокиров, И.Н. Ганиев, А.Э. Бердиев, Н.Ф. Иброхимов // Известия Санкт-Петербургского государственного технический институт (технологического университета). -2017. -№ 41 (67). -С. 22-26.

[58]. Эсанов, Н.Р. Влияние иттрия на удельную теплоемкость и изменение термодинамических функции сплава АЖ2.18 / Н.Р. Эсанов, И.Н. Ганиев, А.Х. Хакимов, Н.Ф. Иброхимов // Известия Юго-Западного

государственного университета. Серия техника технология. -2018. -Т. 8. -№ 2 (27). -С. 75-84.

[59]. Муллоева, Н.М. Температурная зависимость теплоемоксти и изменение термодинамических функции сплавов системы Pb-Ba / H.M. Муллоева, И.Н. Ганиев, Б.Б. Эшов, М.С. Аминбекова // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. -2018. -№ 2. -С. 69-75.

[60]. Ганиев, И.Н. Температурная зависимость теплоемкости и изменение термодинамических функций сплава АК1, модифицированного кальцием / И.Н. Ганиев, С.Э. Отаджонов, Н.Ф. Иброхимов, М. Махмудов, М.М. Сангов // Политехнический вестник. Серия Интеллект. Инновации. Инвестиции. -2018. -№ 2 (42). -С. 17-21.

[61]. Ганиев, И.Н. Влияние висмута на температурную зависимость теплоемкости сплава АЖ4.5 / А.Г. Сафаров, И.Н. Ганиев, Ф.Р. Одинаев, К. Кабутов, У.Ш. Якубов // Мат. Республиканской научно-практической конференции «Современные проблемы естественных наук» в Филиале Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова в городе Душанбе. -2017. -С. 131-134.

[62]. Ганиев, И.Н. Температурная зависимость теплоемкости алюминиевого сплава АЖ4.5, легированного свинцом / А.Г. Сафаров, И.Н. Ганиев, Ф.Р. Одинаев, У.Ш. Якубов // Мат. Республиканской научнопрактической конференции «Перспективы развития естественных наук», «Программы посвященной реализации развития естественных, математических и химических наук на 2010-2020 годы» и «Государственная программа экологии в РТ на 2009-2019 годы» (РТСУ, Душанбе, 29 марта). -2018. -C. 54-58.

[63]. Ганиев, И.Н. Влияние добавок олова на изменение термодинамических функций сплава АЖ4.5 / А.Г. Сафаров, И.Н. Ганиев, Ф.Р. Одинаев, У.Ш. Якубов К. Кабутов, // Сб. материалов VIII Международной научно-практической конференции «Перспективы использования материалов

устойчивых к коррозии в промышленности Республики Таджикистан», посвященной «Дню химика» и 70-летию д.х.н., проф., академика АН Республики Таджикистан. Ганиева И.Н. -2018. -С. 28-32.

[64]. Малый патент Республики Таджикистан № ТЈ 877, МПК G01N25/00. Установка для измерения теплоемкости и теплопроводности веществ / заявитель и патентообладатели: И.Н. Ганиев, Х.Х. Муминов, Н.И. Ганиева, Ф.Р. Одинаев, Н.Ф. Иброхимов, К. Кабутов, А.Г. Сафаров, Ш.М. Асламшоев, Ф.Ш Зокиров / заявка №1701106; заявл. 20.04.2017; опубл. 19.02.2018.

[65]. Foley, R.T. Localized corrosion of aluminum alloys / R.T. Foley // Corrosion (USA). -1986. -No. 56. -Vol. 42. -P. 277–278.

[66]. Лепинских, Б.М. Окисление жидких металлов и сплавов / Б.М. Лепинских, А. Киташев, А. Белоусов. -М.: Наука, 1973. -106 с.

[67]. Лепинских, Б.М. Об окислении жидких металлов и сплавов кислородом из газовой фазы / Б.М. Лепинских, В. Кисилёв // Изв. АН СССР. Металлы. -1974. -№ 5. -С. 51-54.

[68]. Хакимов, А.Х. Влияние церия на кинетику окисления твердого сплава А1+2.18% Fe / А.Х. Хакимов, И.Н. Ганиев, И.Т. Амонов, А.Э. Бердиев // Известия АН Республики Таджикистан. -2012. -№ 3 (148). -С. 87-91.

[69]. Худойбердизода, С.У. Кинетика окисления свинца, легированного медью, в твердом состоянии / С.У. Худойбердизода, И.Н. Ганиев, Дж.Х. Джайлоев, Н.М. Муллоева, У.Ш. Якубов // Мат. Международной научной конференции «Современные проблемы естественных и гуманитарных наук и их роль в укреплении научных связей между странами», посвященной 10летию Филиала МГУ имени М.В. Ломоносова в г. Душанбе, 10-11 октября. - 2019. -С. 134-139

[70]. Ганиев, И.Н. Влияние добавок свинца на кинетику окисления сплава АЖ4.5, в твердом состоянии / И.Н. Ганиев, А.Г. Сафаров, Ф.Р. Одинаев, У.Ш. Якубов, Н.И. Ганиева // Мат. XXI Международной научно-практической конференции «Металлургия: технологии, инновации,

качество» в 2-х ч. Ч. 1, под ред. Е.В. Протопопова, СибГИУ, г.Новокузнецк, 23-24 октября. -2019. -С. 245-250.

[71]. Ганиев, И.Н. Кинетика окисления свинцового сплава ССу3 с кальцием, в твердом состоянии / И.Н. Ганиев, О.Х. Ниезов, Н.М. Муллоева, У.Ш. Якубов // Мат. XXI Международной научно-практической конференции «Металлургия: технологии, инновации, качество» в 2-х ч. Ч. 1, под ред. Е.В. Протопопова, СибГИУ, г.Новокузнецк, 23-24 октября. -2019. -С. 265-270.

[72]. Зокиров, Ф.Ш. Влияние кальция на кинетику окисления сплава АК12М2 в твердом состоянии / Ф.Ш. Зокиров, И.Н. Ганиев, Н.И. Ганиева, М.М. Сангов // Вестник Таджикского национального университета. Серия естественных наук. -2018. -№ 4. -С. 130-138.

[73]. Джайлоев, Дж.Х. Кинетика окисления алюминиевого сплава АЖ2.18 с кальцием / Дж.Х. Джайлоев, И.Н. Ганиев, А.Х. Хакимов, Х.Х. Азимов // Вестник Таджикского национального университета. Серия естественных наук. -2018. -№ 4. -С. 214-220.

[74]. Назаров, Ш.А. Кинетика окисления сплава Al+6%Li, модифицированного лантаном в твердом состоянии / Ш.А. Назаров, И.Н. Ганиев, Irene Calliari., А.Э. Бердиев, Н.И. Ганиева // Металлы. -2018. -№ 1. -С. 34-40.

[75]. Назаров, Ш.А. Кинетика окисления сплава Al+6%Li, модифицированного церием / Ш.А. Назаров, И.Н. Ганиев, Б.Б. Эшов, Н.И. Ганиева // Металлы. -2018. -№. 3 -С. 33-38.

[76]. Ганиев, И.Н. Особенности окисления алюминиевых расплавов с редкоземельными металлами / И.Н. Ганиев, Н.И. Ганиева, Д.Б. Эшова // Металлы. -2018. -№ 3. -С. 39-47.

[77]. Норова, М.Т. Кинетика окисления сплава АМг0.2 с лантаном, празеодимом и неодимом в твёрдом состоянии / М.Т. Норова, И.Н. Ганиев, Б.Б. Эшов // Известия Санкт-Петербургского государственного технического института (технологического университета). -2018. -№ 44 (70). -С. 35-39.

[78]. Ганиев, И.Н. Кинетика окисления сплава АК9М2, легированного скандием / И.Н. Ганиев, Дж.Т. Ашурматов, С.С. Гулов, А.Э. Бердиев // Доклады Академия наук Республики Таджикистан. -2017. -Т. 60. -№ 10. -С. 552-556.

[79]. Одинаева, Н.Б. Высокотемпературное окисление сплава Zn+0.5% Al, легированного таллием, в твердом состоянии / Н.Б. Одинаева, И.Н. Ганиев, З.Р. Обидов, Ф.Р. Сафарова // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. -2018. -№ 1 (41). -С. 113-119.

[80]. Рахимов, Ф.А. Влияние молибдена на анодное поведение сплава Zn55Al, в нейтральной среде / Ф.А. Рахимов, У.Ш. Якубов, З.Р. Обидов, И.Н. Ганиев // В сб: Инновационные научные исследования: теория, методология, практика, сборник статей победителей VI Международной научно-практической конференции, г.Пенза. -2017. -С. 48-51.

[81]. Одинаева, Н.Б. Анодное поведение сплава Zn+0.5% Al легированного индием и таллием, в нейтральной среде / Н.Б. Одинаева, У.Ш. Якубов // В сб: Научных достижения и открытия современной молодёжи, сборник статей победителей Международной научно-практической конференции, 2 частях, г.Пенза. -2017. -С. 30-32.

[82]. Худойбердизода, С.У. Потенциодинамическое исследование сплава ССуЗ, легированного медью, в среде электролита NaCl / С.У. Худойбердизода, И.Н. Ганиев, Н.М. Муллоева, Дж.Х. Джайлоев, У.Ш. Якубов // Вестник Таджикского национального университета. Серия естественных наук. -2019. -№ 1. -С. 206-212.

[83]. Худойбердизода, С.У. Потенциодинамическое исследование анодного поведения сплавов свинца с медью, в среде электролита NaCl / C.У. Худойбердизода, И.Н. Ганиев, Н.М. Муллоева, Дж.Х. Джайлоев, У.Ш. Якубов // Мат. Республиканкой научно-практической конференции XV чтения «Современное Нумановские состояние химической науки И достижений Республики использование ee В народном хозяйстве

Таджикистан» (Институт химии им. В.И. Никитина Академия наук Республики Таджикистан, Душанбе, 24 октября). -2019. -С. 221-222.

[84]. Ганиев, И.Н. Анодное поведение свинцового сплава ССу3 с кадмием, в среде электролита NaCl / И.Н. Ганиев, М.С. Аминбекова, Б.Б. Эшов, У.Ш. Якубов, Н.М. Муллоева // Вестник Казанского технологического университета. - 2019. -Т. 22. -№ 1. -С. 42-46

[85]. Якубов, У.Ш. Влияние добавок цинка на потенциал свободной коррозии сплава ССуЗ, в среде электролита 3%-ного NaCl / У.Ш. Якубов, М.С. Аминбекова, С.У. Худойбердизода // Мат. Международной научно-практической конференции «Вопросы современной научных исследований», г.Омск. -2017. -№ 8-1(11). -С. 59-62.

[86]. Аминбекова, М.С. Влияние цинка на потенциал свободной коррозии сплава ССуЗ / М.С. Аминбекова, И.Н. Ганиев, У.Ш. Якубов, Б.Б. Эшов, Дж.Х. Джайлоев // Мат. Республиканской научно-практической конференции «Современные проблемы естественных наук» в Филиале Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова в городе Душанбе. -2017. -С.128-131

[87]. Аминбекова, М.С. Исследование свободного потенциала сплава ССуЗ, легированного цинком, в среде электролита NaCl / М.С. Аминбекова, И.Н. Ганиев, У.Ш. Якубов, Б.Б. Эшов, Дж.Х. Джайлоев // Мат. Республиканской научно-практической конференции XIV Нумановские чтения, посвящённые Году молодежи «Вклад молодых учёных в развитие химической науки Института химии им. В.И. Никитина Академия наук Республики Таджикистан» -2017. -С. 106-108.

[88]. Аминбекова, М.С. Электрохимическое коррозия свинцового сплава ССу3 с кадмием в среде электролита NaCl / М.С. Аминбекова, И.Н. Ганиев, Б.Б. Эшов, У.Ш. Якубов, Н.И. Ганиева // Мат. Республиканской научно-практической конференции «Роль народного творчество в развитии и устойчивости национальной культуры», посвящённой объявлению 2019-

2021гг. Годами развития села, туризма и народного творчества» (ТГПУ имени С. Айни, Душанбе, 10 мая). -2019. -С. 272-276

[89]. Малый патент Республики Таджикистан № ТЈ 839. Протекторный сплав на основе алюминия / И.Н. Ганиев, А.Г. Сафаров, Ф.Р. Одинаев, К. Кабутов, Х.Х. Муминов, У.Ш. Якубов / №1601077; заявл. 01.12.2016; опубл. 12.06.2017.

[90]. Малый патент Республики Таджикистан № ТЈ 983. МПК С22 С 11/08. Способ повышения коррозионной устойчивости свинца и его сплавов / И.Н. Ганиев, Ф.Р. Одинаев, О.Х. Ниёзов, А.Г. Сафаров, Б.Б. Эшов, К. Кабутов, У.Ш. Якубов, Н.М. Муллоева / №1801244; заявл. 11.10.2018; опубл. 18.03.2019.

[91]. Малый патент Республики Таджикистан № ТЈ 987. МПК С 22 В 21/00. Способ повышения коррозионной стойкости алюминиево-магниевых сплавов / И.Н. Ганиев, Ф.С. Давлатзода, Н.Ф. Иброхимов, Ё.Дж. Холов, Б.Ш. Нарзиев, П.Н. Караев, Х.Я. Шарипова, У.Ш. Якубов / №1901284; заявл. 19.02.2019; опубл. 15.04.2019.

[92]. Малый патент Республики Таджикистан № ТЈ 1001. МПК С22 С 11/08. Способ повышения коррозионной устойчивости свинца и его сплавов с сурьмой / И.Н. Ганиев, Б.Б. Эшов, С.У. Худойбердизода, Дж.Х. Джайлоев, У.Ш. Якубов, Ф.У. Обидов, Н.М. Муллоева, О.Х. Ниёзов, М.С. Аминбекова, Р.А. Исмоилов / №1801241; заявл. 05.10.2018; опубл. 14.06.2019.

[93]. Малый патент Республики Таджикистан № ТЈ 1004. МПК С 22 21/00. Протекторный сплав на основе алюминия / И.Н. Ганиев, Л.А. Бокиев, А.Х. Хакимов, А.Г. Сафаров, У.Ш. Якубов, Н.И. Ганиева, Дж.Х. Джайлоев / №1901275; заявл. 25.01.2019; опубл. 14.06.2019.

[94]. Одинаев, Ф.Р. Потенциодинамическое исследование сплава АЖ4.5, легированного свинцом, в среде электролита NaCl / Ф.Р. Одинаев, И.Н. Ганиев, А.Г. Сафаров, У.Ш. Якубов У.Ш. // Обработка сплошных и слоистых материалов. -2016. -№ 2 (45). -С. 64-68.

[95]. Одинаев, Ф.Р. Стационарные потенциалы сплава АЖ 4,5, легированного свинцом, в среде электролита NaCl / Ф.Р. Одинаев, И.Н. Ганиев, А.Г. Сафаров, У.Ш. Якубов У.Ш. // Сб. материалов Республиканской научно-практической конференции «Проблемы материаловедения в Республике Таджикистан». Институт химии им. В.И. Никитина АН Республики Таджикистан. -2016. -С. 67-68.

[96]. Бокиев, Л.А. Влияние лития на коррозионно-электрохимическое поведение алюминиевого сплава АЖ5К10 в среде электролита NaCl / Л.А. Бокиев, И.Н. Ганиев, Н.И. Ганиева, А.Х. Хакимов, У.Ш. Якубов // Вестник Тверского государственного университета. Серия: Химия. -2019. -№ 3 (37). - С. 79 -89.

[97]. Бокиев, Л.А. Влияние лития на потенциал свободной коррозии сплава АЖ5К10 / Л.А. Бокиев, И.Н. Ганиев, Дж.Х. Джайлоев, Х.Х. Азимов, У.Ш. Якубов // Сб. материалов Республиканкой научно-практической конференции «Проблемы материаловедения в Республике Таджикистан». Институт химии им. В.И. Никитина Академия наук Республики Таджикистан. -2016. -С. 113-114.

[98]. Бокиев, Л.А. Потенциал свободной коррозии алюминиевого сплава АЖ5К10 с литием в среде электролита NaCl / Л.А. Бокиев, И.Н. Ганиев, А.Х. Хакимов, У.Ш. Якубов // Мат. IV Международной научной конференции «Вопросы физической и координационной химии», посвященной памяти д.х.н., профессора Якубова Х.М. и Юсуфова З.Н., (THУ, Душанбе, 3-4 мая). -2019. -С.107-111.

[99]. Джайлоев, Дж.Х. Анодное поведение сплава Al+2.18%Fe, легированного стронцием в среде электролита NaCl / Дж.Х. Джайлоев, И.Н. Ганиев, И.Т. Амонов, У.Ш. Якубов // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. -2019. -№ 1 (27). -С. 42-46

[100]. Одинаев, Ф.Р. Стационарные потенциалы и анодное поведение сплава АЖ 4.5, легированного висмутом / Ф.Р. Одинаев, И.Н. Ганиев, А.Г. Сафаров, У.Ш. Якубов // Известия Санкт-Петербургского государственного

технического института (технологического университета). -2017. -№ 38. -С. 8-12.

[101]. Мальцев, М.В. Модифицирование структуры металлов и сплавов / М.В. Мальцев. -М.: Металлургия, 1984. -280 с.

[102]. Семенченко, В.К. Поверхностные явления в металлах и сплавах / В.К. Семенченко. -М.: Изд-во нучно-техн. литературы, 1956. -135 с.

[103]. Вахобов, А.В. Диаграммы состояния двойных и тройных систем с участием бария и стронция / А.В. Вахобов, И.Н. Ганиев. -Душанбе: Дониш, 1992. -296 с.

[104]. Назаров, Х.М. Барий и его сплавы / Х.М. Назаров, А.В. Вахобов, И.Н. Ганиев, Т.Д. Джураева. -Душанбе: Дониш, 2001. -211 с.

[105]. Вахобов, А.В. Стронций-эффективный модификатор силуминов / А.В. Вахобов, И.Н. Ганиев // Литейное производство. -2000. -№ 5. -С. 28.

[106]. Каргаполова, Т.Б. Барий-новый модификатор силуминов / Т.Б. Каргаполова, Х.А. Махмадуллоев, И.Н. Ганиев, М.М. Хакдодов // Литейное производство. -2001. -№ 10. -С. 6-9.

## Список научных публикаций соискателя по теме диссертации:

[1-А]. Ганиев, И.Н. Влияния кальция на температурную зависимость удельной теплоемкости и изменений термодинамических функций алюминиевого сплава АЖ5К10 / И.Н. Ганиев, **У.Ш. Якубов,** М.М. Сангов, А.Г. Сафаров // Вестник Казанского технологического университета. -2018. - Т. 21. -№ 8. -С. 11-15.

[2-А]. **Якубов, У.Ш.** Влияние стронция на температурную зависимость удельной теплоемкости и изменений термодинамических функций сплава АЖ5К10 / У.Ш. Якубов, И.Н. Ганиев, М.М. Махмадизода, А.Г. Сафаров, Н.И. Ганиева // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия естественных наук. -2018. -№ 3. -С. 61-67.

[3-А]. **Якубов, У.Ш.** Влияние добавок кальция на коррозионноэлектрохимическое поведение сплава АЖ5К10, в среде электролита NaCl / Якубов У.Ш., Ганиев И.Н., Сангов М.М., Амини Р.Н. // Вестник ЮжноУральского государственного университета. Серия «Металлургия». -2018. -Т. 18. -№ 3. -С. 5-15.

[4-А]. **Якубов, У.Ш.** Электрохимическая коррозия сплава АЖ5К10, модифицированного барием, в среде электролита NaCl / У.Ш. Якубов, И.Н. Ганиев, М.М. Сангов // Известия Санкт-Петербургского государственного технического института (технологического университета). -2018. -№ 43 (69). -С. 23-27.

[5-А]. **Якубов, У.Ш.** О коррозионном потенциале сплава АЖ5К10, модифицированного щелочноземельными металлами, в среде электролита NaCl / Якубов У.Ш., Ганиев И.Н., Сангов М.М., Ганиева Н.И. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. -2018. -Т. 16. -№ 3. -С. 109-119.

[6-А]. Ганиев, И.Н. Анодное поведение сплава АЖ5К10, модифицированного стронцием, в среде электролита NaCl / И.Н. Ганиев, **У.Ш. Якубов,** М.М. Сангов, А.Х. Хакимов // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. -2017. -№ 4 (22). -С. 57-62.

[7-А]. Малый патент РТ № ТЈ 860, С 22 С 21/00. Протекторный сплав на основе алюминия / И.Н. Ганиев, **У.Ш. Якубов,** М.М. Сангов, Л.А. Бокиев, М.Ш. Джураева // №1701120; заявл.01.06.2017, опубл. 01.12.2017.

[8-А]. Малый патент РТ № ТЈ 1004, МПК С 22 С 21/00. Протекторный сплав на основе алюминия / И.Н. Ганиев, Л.А. Бокиев, А.Х. Хакимов, А.Г. Сафаров, Н.И. Ганиев, **У.Ш. Якубов,** Дж.Х. Джайлоев // №1901275; заявл.25.01.2019, опубл. 14.06.2019.

[9-А]. **Якубов, У.Ш.** Влияние стронция на изменение термодинамических функций алюминиевого сплава АЖ5К10 / У.Ш. Якубов // Мат. XIV Межд. науч. конф. студентов и молодых ученых «GYLYM JÁNE BILIM - 2019». ЕНУ им. Л.Н. Гумилёва, г.Астана. -2019. -С. 1051-1055.

[10-А]. **Якубов, У.Ш.** Кинетика окисления алюминиевого сплава АЖ5К10 с кальцием / У.Ш. Якубов, И.Н. Ганиев, А.Х. Хакимов, Н.И. Ганиева, Дж.Х Джайлоев // Мат. XXI Межд. научно-прак. конф.

«Металлургия: технологии, инновации, качество». СибГИУ, г.Новокузнецк. - 2019. -С. 260-265.

[11-А]. **Якубов, У.Ш.** Температурная зависимость теплоемкости алюминиевого сплава АЖ5К10 с кальцием / У.Ш. Якубов, И.Н. Ганиев, М.М. Махмадизода, Н.И. Ганиева // Мат. IV Межд. науч. конф. «Вопросы физической и координационной химии», посвяще. памяти д.х.н., профессор Якубова Х.М. и Юсуфова З.Н. ТНУ, г.Душанбе. -2019. -С. 111-115.

[12-А]. **Якубов, У.Ш.** Влияния кальция на температурную зависимость изменений термодинамических функций сплава АЖ5К10 / У.Ш. Якубов, И.Н. Ганиев, М.М. Махмадизода, Н.И. Ганиева // Мат. Межд. научно-прак. конф. студенты, магистрантов, соискателей и учёных «Мухандис-2019». ТТУ им. М.С. Осими, г.Душанбе. -2019. -С. 48-52.

[13-А]. **Якубов, У.Ш.** Удельная теплоёмкость и коэффициент теплоотдачи алюминиевого сплава АЖ5К10 со стронцием / У.Ш. Якубов, И.Н. Ганиев, М.М. Махмадизода, Н.И. Ганиева, Л.А. Бокиев // Мат. Респ. научно-прак. конф. «Актуальные вопросы дифференциальных уравнений, математического анализа, алгебры и теории чисел и их приложения». РТСУ, г.Душанбе. -2019. -С. 365-369.

[14-А]. **Якубов, У.Ш.** Коррозия алюминиевого сплава АЖ5К10 с щелочноземельными металлами / Якубов У.Ш., Ганиев И.Н., Хакимов А.Х., Ганиев Н.И. // Мат. Респ. научно-прак. конф. (с международном участием) «Применение инновационных технологий в преподавании естественных дисциплин в СОШ и ВУЗах» и «Инновация в преподавании естественных наук», посвящ. 150-летию периодической таблицы химических элементов Д.И. Менделеева. ТНУ, г.Душанбе. -2019. -С. 207-211.

[15-А]. **Якубов, У.Ш.** Потенциодинамическое исследование сплава АЖ5К10, модифицированного барием, в среде электролита NaCl / У.Ш. Якубов, И.Н. Ганиев, М.М. Сангов, Н.И. Ганиева // Мат. Респ. научно-прак. конф. «Наука и техника для устойчивого развития», ТУТ, г.Душанбе, -2018. - С. 215-217.

[16-А]. **Якубов, У.Ш.** Влияние добавок кальция на коррозионный потенциал и потенциал питингообразования сплава АЖ5К10 / У.Ш. Якубов, И.Н. Ганиев, Л.А. Бокиев, Н.Р. Эсанов // Мат. VII Межд. научно-прак. конф. «Лучшая научная статья 2017», г.Пенза. -2017. -С. 19-25.

[17-А]. **Якубов, У.Ш.** Влияние бария и хлорид-иона на потенциал свободной коррозии сплава АЖ5К10 / У.Ш. Якубов, И.Н. Ганиев, Л.А. Бокиев, М.Ш. Джураева // Мат. XXI Межд. научно-прак. конф. «Исследование различных направлений современной науки». г.Москва. - 2017. -С. 124-126.

[18-А]. **Якубов У.Ш.** Анодное поведение сплава АЖ5К10, модифицированного кальцием / У.Ш. Якубов, И.Н. Ганиев, М.М. Сангов, Л.А. Бокиев // Мат. Республиканской научно-практической конференции «Стратегия и аспекты развития горной промышлености Республики Таджикистан». Филиал НИТУ «МИСиС» в г.Душанбе. -2017. -С. 179-181.

[19-А]. **Якубов, У.Ш.** Потенциодинамическое исследование сплава АЖ5К10, модифицированного стронцием, в среде электролита NaCl / У.Ш. Якубов, И.Н. Ганиев, М.М. Сангов, А.Х. Хакимов // Мат. научно-прак. семинара «Наука-производству» посвящ. 100 летию НИТУ «МИСиС». г.Турсунзаде. -2017. -С.36-38.

[20-А]. **Якубов, У.Ш.** Потенциал свободной коррозии сплава АЖ5К10 с кальцием, в среде электролита NaCl / У.Ш. Якубов, И.Н. Ганиев, Л.А. Бокиев, Н.Р. Эсанов, М.Ш. Джураева // Мат. Межд. конф. «Перспективы развития физической науки», посвящ. памяти (80-летию) профессора Хакимова Ф.Х. ТНУ, г.Душанбе. -2017. -С. 177-180.

[21-А]. Ганиев, И.Н. Влияние железа на потенциал коррозии алюминия в среде электролита NaCl / И.Н. Ганиев, Дж.Х. Джайлоев, Л.А. Бокиев, **У.Ш. Якубов** // Мат. XIII Межд. научно-прак конф. «Нумановские чтения», посвящ.70-летию основании Института химии им. В.И. Никитина АН РТ и достижения химической науки за 25 лет Государственной независимости Республики Таджикистан, г.Душанбе. -2016. -С. 121-124.

## приложение

ГУВОХНОМА Махрванд Якубов У.Ш. муаллифи ихтиров ХУЛАИ ПРОТЕКТОРЙ ДАР АСОСИ АЛЮМИНИ Ба ихтиров нахустпатенти № ТЈ 860 дода шудааст. Дорандан Институти кимиёй ба номи В.И. Никитини Академиян и нахустпатент Институти кимиёй ба номи В.И. Никитини Академиян и махустпатент Институти кимиёй ба номи В.И. Никитини Академиян и ихустиатент Институти кимиёй ба номи В.И. Никитини Академиян и махустпатент Институти кимиёй ба номи В.И. Никитини Академиян и махустпатент Институти кимиёй ба номи В.И. Никитини Академиян и Каммуаллиф(он) Ганлев И.Н., Сангов М.М., Бокяев Л.А., Чураева М.И Аввалияти ихтиров 01.06.2017 Таърихи рўзи нешниходи ариза 01.06.2017 Аризаи № 1701120 Дар Фехристи давлатин ихтировхой Чумхурии Точикистон 1 декабри с. 2017 ба кайд тирифта шуд Нахустпатент зьтибор дорад аз 1 июни с. 2017 то 1 июни с. 2	<b>ЧУМХУРИИ</b> ТОЧИКИСТОН	H	ИДОРАИ ПАТЕНТИ
Шахрванд Якубов У.Ш. муаллифи ихтиров ХӮЛАИ ПРОТЕКТОРЙ ДАР АСОСИ АЛЮМИНИ Ба ихтиров нахустпатенти № ТЈ 860 дода шудааст. Дорандал Институти кимиёй ба номи В.И. Никитини Академияи и ихустнатент Институти кимиёй ба номи В.И. Никитини Академияи и умхурии Точикистон Сарзамин Чумхурии Точикистон Сарзамин Чумхурии Точикистон Хаммуаллиф(он) Ганиев И.Н., Сангов М.М., Бокиев Л.А., Чураева М.І Аввалияти ихтироь 01.06.2017 Таърихи рўзи нешниходи ариза 01.06.2017 Аризаи № 1701120 Дар Фехристи давлатии ихтироъхой Чумхурии Точикистон 1 декабри с.2017 ба кайд гирифта шуд Нахустпатент эьтибор дорад аз 1 июни с. 2017 то 1 июни с. 2 Ин гувохнома хантоми амалй гардонидани ху имтиёзкося, кы барои муаллифони ихтироонидани ху имтиёзкося, кы барои муаллифони ихтироонидани ху имтиёзкося, кы барои муаллифони ихтироонидани ху имтиёзкося, кы барои мукаррар гардидаанд, няшон дола мен		увохно	MA
муаллифи ихтиром ХӮЛАИ ПРОТЕКТОРЙ ДАР АСОСИ АЛЮМИНИ Ба ихтироь нахустпатенти № ТЈ 860 дода шудааст. Дорандаи Институти кимиён ба номи В.И. Никитини Академияи и нахустпатент Институти кимиён ба номи В.И. Никитини Академияи и чумхурии Точикистон Сарзамин Чумхурии Точикистон Хаммуаллиф(он) Fанлев И.Н., Сангов М.М., Бокиев Л.А., Чураева М.И Аввалияти ихтироь 01.06.2017 Таърихи рўзи пешниходи ариза 01.06.2017 Аризаи № 1701120 Дар Фехристи давлатии ихтироьхой Чумхурии Точикистон І декабри с. 2017 ба кайд гирифта шуд Нахустпатент зьтибор дорад аз І июни с. 2017 то І июни с. 2	Шахрванд Якубов У		
Ба ихтироъ нахустпатенти № ТЈ 860 лода шудааст. Дорандаи нахустпатенти Институти кимиён ба номи В.И. Никитини Академияи и ихустпатент Институти кимиён ба номи В.И. Никитини Академияи и Чумхурии Точикистон Сарзамин Чумхурии Точикистон Хаммуаллиф(он) Fанлев И.Н., Сангов М.М., Бокиев Л.А., Чураева М.І Аввалияти ихтироъ 01.06.2017 Таърихи рузи пешниходи ариза 01.06.2017 Аризаи № 1701120 Дар Фехристи давлатии ихтироъхой Чумхурии Точикистон 1 декабри с. 2017 ба кайд гирифта шуд Нахустпатент эьтибор дорад аз 1 июни с. 2017 то 1 июни с. 2 Ин гувохнома хантоми амали гардонидани ху имтиёзхое, ки барои муаллифони ихтироот бо ковунгуз чори мукаррар гардидаанд, няшон дода мен	муаллифи ихтирои	ХӮЛАИ ПРОТЕКТОРЙ	і ДАР АСОСИ АЛЮМИНИ
Ба ихтироъ нахустпатенти № ТЈ 860 дода шудааст. Дорандай нахустпатент Институти кимиён ба номи В.ЗІ. Никитини Академиян и Чумхурии Точикистон Сарзамин Чумхурии Точикистон Хаммуаллиф(он) Fаниев И.Н., Сангов М.М., Бокиев Л.А., Чураева М.І Аввалияти ихтироъ 01.06.2017 Таърихи рузи нешниходи ариза 01.06.2017 Аризаи № 1701120 Дар Фехристи давлатии ихтироъхои Чумхурии Точикистон 1 декабри с. 2017 ба кайд гирифта шуд Нахустпатент эьтибор дорад аз 1 июни с. 2017 то 1 июни с. 2 Ин гувохнома хангоми амалй гардонидани ху поли муаллифони ихтироот бо конунтуз тори мукаррар гардидаанд, нишон дола мен			
Дорандаи нахустнатент       Институти кимиён ба номи В.И. Никитини Академиян и Чумхурии Точикистон         Сарзамин       Чумхурии Точикистон         Хаммуаллиф(он)       Ганиев И.Н., Сангов М.М., Бокиев Л.А., Чураева М.І         Аввалияти       ихтироъ         01.06.2017         Таърихи рузи нешниходи ариза       01.06.2017         Аризаи       №         1701120         Дар Фехристи давлатии ихтироъхои Чумхурии Точикистон         1 декабри       с. 2017         ба кайд гирифта шуд         Нахустпатент эътибор дорад       аз         Ин гувохнома хантоми амалй гардонидани ху чори мукаррар гардидаанд, няшон дола мен	Ба ихтироъ нахустпатенти № Т.	J 860	дода шудааст.
Сарзамин Чумхурии Точикистон Хаммуаллиф(он) Ғаниев И.Н., Сангов М.М., Бокиев Л.А., Чураева М.І Аввалияти ихтироъ 01.06.2017 Таърихи рузи пешниходи ариза 01.06.2017 Аризаи № 1701120 Дар Фехристи давлатии ихтироъхои Чумхурии Точикистон 1 декабри с. 2017 ба қайд тирифта шуд Нахустпатент эьтибор дорад аз 1 июни с. 2017 то 1 июни с. 2 Ин гувохнома хангоми амали гардонидани ху чмтиёзхое, ки барои муаллифони ихтироот бо конунтуз чори мукаррар гардидаанд, нишон дола мен	Дорандаи нахустнатент Инсти	итути кимиёи ба номи В Чумхури	.И. Никитини Академияи и и Точикистон
Хаммуаллиф(он) Ғаниев И.Н., Сангов М.М., Бокиев Л.А., Чураева М.І Аввалияти ихтироъ 01.06.2017 Таърихи рузи пешниходи ариза 01.06.2017 Аризаи № 1701120 Дар Фехристи давлатии ихтироъхои Чумхурии Точикистон 1 декабри с. 2017 ба кайл гирифта шуд Нахустватент эътибор дорад аз 1 июни с. 2017 то 1 июни с. 2 Ин гувохнома хангоми амалй гардонидани ху имтиёзхое, ки барои муаллифони ихтироот бо конунгуз чорй мукаррар гардидаанд, нишон дола мен	Сарзамин Цумхури	и Точикистон	
Аввалияти ихтироъ 01.06.2017 Таърихи рузи пешниходи ариза 01.06.2017 Аризаи № 1701120 Дар Фехристи давлатии ихтироъхои Чумхурии Точикистон 1 декабри с. 2017 ба кайд гирифта шуд Нахустпатент эътибор дорад аз 1 июни с. 2017 то 1 июни с. 2 Ин гувохнома хантоми амалй гардонидани ху имтиёзхое, ки барои муаллифони ихтироот бо конунгуз чорй мукаррар гардидаанд, нишон дола мен	Хаммуаллиф(он) Fai	ниев И.Н., Сангов М.М	, Бокиев Л.А., Чураева М.І
Таърихи рузи нешниходи ариза 01.06.2017 Аризаи № 1701120 Дар Фехристи давлатии ихтироъхон Чумхурии Точикистон 1 декабри с. 2017 ба кайд гирифта шуд Нахустпатент эътибор дорад аз 1 июни с. 2017 то 1 июни с. 2 Ин гувохнома хантоми амалй гардонидани ху имтиёзхое, ки барои муаллифони ихтироот бо конунгуз чорй мукаррар гардидаанд, нишон дола мен	Аввалияти ихтироъ	<b>01.06.2017</b>	14141414141414141414141414141414141414
Аризаи № 1701120 Дар Фехристи давлатии ихтироъхои Чумхурии Точикистон 1 декабри с. 2017 ба кайл гирифта шуд Нахустпатент эьтибор дорад аз 1 июни с. 2017 то 1 июни с. 2 Ин гувохнома хантоми амалй гардонидани ху имтиёзхое, ки барои муаллифони ихтироот бо конунгуз чорй мукаррар гардидаанд, нишон дола мен	Таърихи рузи пешни	иходи ариза 01.06.20	
Дар Фехристи давлатии ихтироъхон Чумхурии Точикистон 1 декабри с. 2017 ба кайд гирифта шуд Нахустпатент эътибор дорад аз 1 июни с. 2017 то 1 июни с. 2 Ин гувохнома хангоми амалй гардонидани ху имтиёзхое, ки барои муаллифони ихтироот бо конунгуз чорй мукаррар гардидаанд, нишон дола мен	Аризаи № 170112		
1 декабри с. 2017 ба кайд гирифта шуд Нахустпатент эътибор дорад аз 1 июни с. 2017 то 1 июни с. 2 Ин гувохнома хангоми амалй гардонидани ху имтиёзхое, ки барои муаллифони ихтироот бо конунгуз чорй мукаррар гардидаанд, нишон дола мен	Дар Фехристи давлати	ии ихтироъхои Цумху ,	рии Точикистон
Ин гувохнома хантоми амалй гардонидани ху имтиёздое, ки барои муаллифони ихтироот бо конунгуз чорй мукаррар гардидаанд, нишон дола мен	l декабри с. 20 Нахустпатент эътибор дорад аз	17 ба кайд гирифта 1 июни с. 2	шуд 017 <sub>то</sub> 1 июни с. 20
	имтиёзхо	Ин гувохнома ханго юе, ки барои муаллифо чорй мукаррар гарл	ми амалй гардонидани ху ни ихтироот бо конунгуз цидаанд, нишон дода меш



Республика Таджикистан ГОСУДАРСТВЕННОЕ ПАТЕНТНОЕ ВЕДОМСТВО

## (12) Описание изобретения

К МАЛОМУ ПАТЕНТУ

### (21) 1701120

(22) 01.06.2017
(46) Бюл.132, 2017
(71)(73) Институт химии им. В.И. Никитина Академии Наук Республики Таджикистан
(72) Ганиев И.Н. (ТЈ); Якубов У.Ш. (ТЈ); Сангов М.М. (ТЈ); Бокиев Л.А. (ТЈ); Джураев М.Ш. (ТЈ)

#### (54) ПРОТЕКТОРНЫЙ СПЛАВ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ

(56) 1. Босеку Гидзюцу, "Doshokugujutsu".1974.№4.с. 191-195.

2. А.С. СССР №785371 от 07.12.80.

3. Жук Н.П. Курс теории коррозии и защиты металлов. М.: Металлургия. 1976. с. 394.

4. Малый патент РТ №ТЈ 782 от 22.02.2016г.

(57) Изобретение относится к области металлургии, а именно к составу алюминиевых сплавов с железом, кремнием, кальцием,

стронцием и барием, которые могут использоваться в качестве анодов (протекторов) при защите от коррозии стальных сооружений.

(19) TJ (11) 860

(51) C 22 C 21/00

Целью изобретения является создание протекторного сплава на основе алюминия такого химического состава, который обладает высокими значениями КПИ (более 90%) в контакте с защищаемым металлом и низкой величиной саморастворения.

йЦель достигается электрохимической защитой стали путем применения протектора на основе алюминиевого сплава, содержащего железа до 5%, кремния до 10% благодаря введению в данный сплав одного или более металлы из группы кальций, стронций, барий до 1,0%,в результате чего коэффициент полезного использование (КПИ) протектора достигает значений 90-95%.





Республика Таджикистан

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ПАТЕНТНОЕ ВЕДОМСТВО

# (12) Описание изобретения к малому патенту

(21) 1901275

(22) 25.01.2019

(46) Бюл.149, 2019

(71) Институт химин им. В.И. Никитина Академии

наук Республики Таджикистан (ТЈ). (72) Ганиев И.Н. (ТЈ); Бокиев Л.А., (ТЈ); Хакимов

А.Х. (ТЈ); Сафаров А.Г. (ТЈ); Якубов У.Ш. (ТЈ); Ганиева Н.И. (ТЈ); Джайлоев Дж.Х. (ТЈ).

(73) Институт химии им. В.И. Никитина Академии

наук Республики Таджикистан (ТЈ).

(54) Протекторный сплав на основе алюминия(56) 1. Босеку Гидзюцу, «Doshoku gujutsu», 1974

№4. c. 191-195

2. А.С. СССР №785371 от 07.12.1980 г. 3. Малый патент № ТЈ 782 от 22.02.2016

(57) Изобретение относится к области металлургии, а именно к составу алюминиевых сплавов с железом, кремнием, которые могут использоваться в качестве анодов (протекторов) при защите от коррозии стальных сооружений. Целью изобретения является создание протекторного сплава на основе алюминия такого химического состава, который обладает высокими значениями КПИ (более 90%) в контакте с защищаемым металлом и низкой величиной саморастворения.

(19) <u>**TJ**</u> (11) 1004 (51) <u>MIIK C 22 C 21/00</u>

Протекторный сплав на основе алюминия, содержит железо, кремний и один из металлов группы литий, магний, церий при следующем соотношении компонентов, масс. %:

Железо	- 0,15 - 5,0
Кремний	- 5,0 - 10,0
Один металл из группы	
литий, магний, церий	- 0,1 - 1,0
Алюминий	— остальное

Таким образом, предложенный сплав на основе алюминия можно использовать в качестве эффективного анода-протектора для защиты стальных изделий, подземных трубопроводов в водных средах, содержащих хлорид-иона.