

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

На правах рукописи

**СИРОДЖИДИНОВ Мунисджон Эркинджонович**

**АНОДНОЕ ПОВЕДЕНИЕ И ОКИСЛЕНИЕ  
СПЛАВА  $Zn_{55}Al$ , ЛЕГИРОВАННОГО  
ГАЛЛИЕМ, ИНДИЕМ И ТАЛЛИЕМ**

**Специальность**

**2.6.17 – Материаловедение (технические науки)**

**АВТОРЕФЕРАТ**

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

**Душанбе – 2024**

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

**Научный  
руководитель:**

**Обидов Зиёдулло Рахматович** - доктор химических наук, доцент, главный научный сотрудник ГНУ «Институт химии им. В.И. Никитина» Национальной академии наук Таджикистана

**Официальные  
оппоненты:**

**Назарзода Хайрулло Холназар** - доктор технических наук, доцент, ректор Таджикского государственного университета коммерции

**Гулов Саломиддин Садриддиновича** - кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Материаловедение, металлургические машины и оборудование» Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими

**Ведущая организация:** Таджикский государственный педагогический университет имени С. Айни, кафедра «Общетеchnических дисциплин и машиноведение»

Защита состоится «3» февраля 2025 года в 10<sup>30</sup> часов на заседании диссертационного совета 73.1.002.02 при ГНУ «Институт химии им. В.И. Никитина» Национальной академии наук Таджикистана по адресу: 734063, Республика Таджикистан, г. Душанбе, ул. Айни, 299/2. E-mail: dissovet@ikai.tj

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте ГНУ «Институт химии им. В.И. Никитина» Национальной академии наук Таджикистана: [www.chemistry.tj](http://www.chemistry.tj)

Автореферат разослан « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 года

**Учёный секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат химических наук**

**Халикова Л.Р.**

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность работы.** Роль цинковых покрытий для защиты стали от морской, атмосферной и подземной коррозии в нейтральных растворах солей велика. Однако, дефицит цинка, а также возрастание скорости коррозии цинка из-за загрязнения окружающей среды вызвали интерес к замене цинковых покрытий цинк-алюминиевыми. Существенная экономия цинка при использовании таких покрытий, связанная с более низкой плотностью алюминия, а также их более высокая коррозионная стойкость в различных условиях привели к разработке промышленной технологии получения стального листа с горячим Zn-Al покрытием. Перспективна другая область применения этих покрытий - для защиты стальных труб, используемых в системах вода- и теплоснабжения. В теплообменниках и системах теплоснабжения протекающая вода имеет температуру 80°C, что может приводить к полному закупориванию труб. При использовании стальных и чугунных водопроводных труб необходимо принимать меры к предотвращению понижению скорости внутренней коррозии.

**Степень изученности научной проблемы.** Известно, что для защиты стали от коррозии разработано несколько типов Zn-Al покрытий. Наибольшее распространение получили «гальвалюм», содержащий 55% Al, 1.6% Si, который хорошо зарекомендовал себя для защиты листовой стали от атмосферной коррозии. Кроме того, он может служить эффективным двусторонним анодным покрытием на трубной стали в условиях холодного и горячего водоснабжения. В результате воздействия горячей воды довольно быстро корродирует преимущественно фаза, обогащенная Zn, что с течением времени приводит к условиям, когда коррозионная стойкость покрытия полностью определяется защитным действием фазы, обогащенной Al. Коррозионная стойкость этой фазы на порядок выше стойкости Zn или фазы, обогащенной цинком. В этой связи признается целесообразным повышение содержания Al по сравнению с его содержанием в типовом сплаве «гальвалюм». Однако вопрос об оптимальном содержании Al в Zn-Al сплавах остается открытым.

Практическое использование анодных покрытий для защиты металлических сооружений от коррозии зависит от особенностей структуры сплавов, состояния поверхности, температуры и свойств самого сплава. Наиболее перспективным является повышение содержания алюминия в Zn-Al сплаве (например – Zn55Al) и переход по фазовому составу к  $\alpha$  - твердому раствору согласно диаграмме состояния. Увеличение содержания Al в сплаве повышает его коррозионную стойкость и позволяет снизить толщину покрытий. Однако при этом возникает опасность пассивации алюминиевой составляющей сплава. В связи с этим рассмотрена возможность активации данного сплава путем введения в его состав микродобавок третьего компонента. Известно, что металлы подгруппы галлия используются как легирующие добавки для повышения коррозионной стойкости сплавов. Учитывая данную особенность элементов подгруппы галлия, в качестве легирующего компонента сплава Zn55Al был выбран металлический галлий, индий и таллий.

**Необходимость проведения исследования.** Важную роль в решении задач по повышению срока службы металлопродукции играют защитные покрытия, использование которых позволяет увеличить долговечность стальных изделий и является одним из эффективных путей снижения потерь металла от коррозии. Решение фундаментальной проблемы целенаправленного подбора эффективных анодных защитных покрытий требует проведения комплексных исследований синтезируемых сплавов в различных коррозионных средах, приближённых условиям эксплуатации.

**Цель работы** заключается в исследовании влияния легирующих добавок галлия, индия и таллия на анодное поведение и окисление сплава Zn55Al и разработке оптимального состава сплавов, которые предназначены в качестве анодных эффективных покрытий для повышения коррозионной стойкости стальных конструкций, изделий и сооружений.

**Задачи исследования:**

- исследование закономерности изменения коррозионно-электрохимических характеристик сплава Zn55Al, легированного галлием, индием и таллием, в кислых, нейтральных и щелочных средах при различных значениях pH;
- изучение влияния легирующих добавок на микроструктуру и различные свойства сплавов;
- исследование закономерности изменения кинетических и энергетических параметров процесса окисления исследуемых сплавов в твердом состоянии;
- определение фазовых составов продуктов окисления указанных сплавов и установление их роли в механизме коррозионного процесса;
- оптимизация состава тройных сплавов по комплексу критерию качеств для использования их как покрытий при анодной защите стальных изделий, конструкций и сооружений от коррозионного разрушения.

**Объекты исследования:** цинк марки ХЧ (гранулированный), алюминий марки А7 и металлический галлий (Ga-00), индий (In-00) и таллий (Tl-00).

**Предметом исследования** является синтез новых цинково-алюминиевых сплавов, легированных галлием, индием и таллием различной концентрации.

**Методы исследования.** Исследование анодного поведения и окисления сплавов проводились микрорентгеноспектральным, потенциостатическим, металлографическим, рентгенофазовым и термогравиметрическим методами.

**Отраслям исследования** является материаловедения и технология синтеза новых анодных Zn-Al сплавов с элементами подгруппы галлия для защиты углеродистых стальных изделий от коррозионного разрушения.

**Этапы исследования.** Диссертационное исследование было выполнено в период 2018-2023 гг. по следующим этапам: синтез сплава Zn55Al с галлием, индием и таллием; изучение их коррозионно-электрохимических и физико-химических характеристик; исследование микроструктуры и продукты коррозии исследованных сплавов; внедрение результатов исследований.

**Основная информационная и экспериментальная база.** Информационной базой диссертационной работы являются научные труды – патенты, монографии, диссертации, периодические научные журналы, материалы симпозиумов, конференций и интернет портал, посвященных

цинковым и цинково-алюминиевым сплавам (глубина поиска более 30 лет).

Исследования выполнены с помощью известных приборов: сканирующего электронного микроскопа SEM серии AIS 2100; импульсного потенциостата ПИ-50.1.1; металлографического микроскопа ERGOLUX AMC; термогравиметрических весов и прибора ДРОН-2.0.

***Научная новизна исследований:***

- установлено, что добавки галлия, индия и таллия в пределах 0.01-0.1 мас.% в 2-3 раза повышают анодную устойчивость сплава Zn55Al, в коррозионно-активных средах;
- наблюдается смещение потенциалов коррозии, питтингообразования и репассивации сплавов в область положительных значений;
- при переходе от легированных галлием сплавов к сплавам с индием, далее к сплавам с таллием скорость коррозии сплавов несколько растёт от pH коррозионной среды, что в целом согласуется с изменением свойств легирующих элементов в пределах подгруппы;
- показано, что характер окисления сплавов систем Zn55Al-Ga(In,Tl) подчиняется гиперболической зависимости;
- с ростом температуры и содержания металла из подгруппы галлия в сплаве Zn55Al скорость окисления незначительно увеличивается; истинная скорость окисления сплавов имеет порядок  $K \cdot 10^{-4}$  ( $\text{кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ );
- энергия активации окисляемости сплавов при переходе от сплавов с галлием к сплавам с индием, далее к сплавам с таллием уменьшается;
- установлен фазовый состав продуктов окисления сплава Zn55Al с галлием, индием и таллием и их роль в механизме анодного растворения;
- при окислении исследованных сплавов образуются оксиды –  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , ZnO,  $\text{Ga}_2\text{O}_3$ ,  $\text{In}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Tl}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZnAl}_2\text{O}_4$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Ga}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{In}_2\text{O}_3$ .

***Теоретические основы исследований.*** В диссертации изложены теоретические аспекты исследований: доказательства влияния структуры, фазового состава, температуры, коррозионной среды и концентрации легирующих добавок на анодное поведение и окисление сплава Zn55Al; закономерности изменения параметров высокотемпературной и электрохимической коррозии сплава Zn55Al с галлием, индием и таллием.

***Практическая значимость работы.*** На основе выполненных экспериментальных исследований установлены оптимальные концентрации галлия, индия и таллия в сплаве Zn55Al, отличающихся коррозионной стойкостью. Выполненные научные исследования послужили основой для разработки состава новых сплавных покрытий, которые защищены малым патентом Республики Таджикистан ТД № 1116. Разработанные сплавы рекомендуются как анодных покрытий для защиты стальных изделий и конструкций от коррозионного разрушения.

На предприятии ООО «Нокили ТАЛКО» г.Душанбе по монтажу и прокладке кабельно-проводниковой продукции внедрены новые цинково-алюминиевые сплавы, разработанные в качестве антикоррозионных покрытий стали (с 10 января по 10 марта 2022 года). Результат составляет 9,4 доллара (12

сомон 70 дирам) за 1 м<sup>2</sup> защищаемой поверхности за счет снижения скорости коррозии стальной кабельных лотков в 2-3 раза (имеется акт внедрения).

***Положения, выносимые на защиту:***

- результаты микрорентгеноспектрального анализа и исследования микроструктуры сплава Zn55Al с галлием, индием и таллием;
- результаты исследования влияние добавок галлия, индия и таллия на анодное поведение сплава Zn55Al, в кислых, нейтральных и щелочных средах при различных значениях pH;
- результаты исследования влияние элементов подгруппы галлия на кинетику окисления сплава Zn55Al, в твердом состоянии;
- результаты рентгенофазового анализа продуктов окисления сплава Zn55Al с галлием, индием и таллием.

***Вклад автора*** заключается в анализе литературных данных, постановке и решении задач исследований, путём проведения экспериментальных исследований, их обработке и анализе, формулировке основных выводов и положений диссертации.

***Степень достоверности и апробация исследования*** обеспечена современными методами исследований и приборов, качественным соответствием полученных диссертационных результатов с имеющимися в литературе экспериментальными данными и теоретическими представлениями. Опыты проводились на приборы прошедших аттестацию. Математическая и статистическая обработка экспериментальных результатов выполнялась с использованием компьютерной программы Microsoft Excel.

***Основные результаты диссертации доложены и обсуждены на следующих конференциях:*** Межд. науч.-практ. конф. «Ускоренная индустриализация – основной фактор развития Таджикистана». Институт энергетики Таджикистана (Кушониён, 2019); Респ. науч.-практ. конф. «Актуальные вопросы естественных наук и технологий». Российско-Таджикский (Славянский) университет (Душанбе, 2020); III Межд. науч.-практ. конф. «Развитие химической науки и области их применения». Таджикский национальный университет (Душанбе, 2021); Межд. науч.-практ. конф. «Роль Российско-Таджикского (Славянского) университета в становлении и развитии науки и инновационного образования в Республике Таджикистан». Российско-Таджикский (Славянский) университет (Душанбе, 2021).

***Публикации.*** По результатам исследований опубликовано 14 работ, в том числе 6 статьи в журналах, рекомендуемых ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации; 3 статьи в других изданиях; 4 статьи в материалах международных и республиканских конференций и получен 1 малый патент Республики Таджикистан на составы разработанных новых сплавов.

***Структура и объем диссертации.*** Диссертация состоит из введения, обзора литературы, трёх глав, выводов, списка литературы и приложений. Работа изложена на 130 страницах компьютерного набора, включает 44 таблиц, 36 рисунков. Список литературы включает 109 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

*Во введении* обоснованы актуальность, сформулированы цели и задачи научной работы, значимость проводимых исследований, отражены научная и практическая значимость в области материаловедения и технологии новых материалов, описана научная новизна и возможность применения результатов в производство, перечислены положения, выносимое на защиту.

*В первой главе* диссертации «**Анодное поведение и окисление цинково-алюминиевых сплавов в различных средах**» приведен анализ имеющихся литературных данных по коррозионной стойкости цинково-алюминиевых сплавов в различных коррозионно-активных средах; высокотемпературная и электрохимическая коррозия цинк-алюминиевых сплавов; структурные составляющие и фазы в оксидных плёнках на основе Zn-Al сплавов.

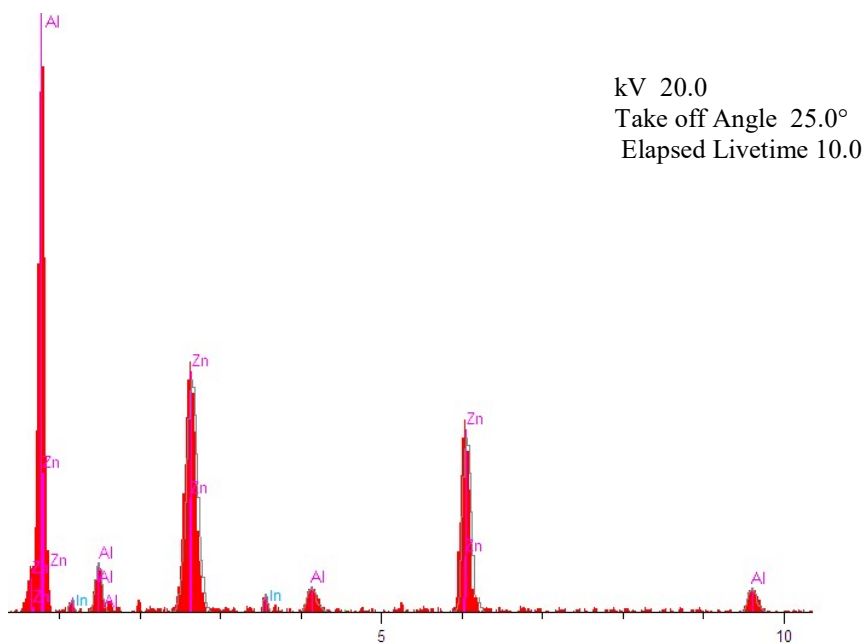
Анализ литературных данных показывают, что различные свойства цинк-алюминиевых сплавов (Zn<sub>0.5</sub>Al, Zn<sub>5</sub>Al, Zn<sub>55</sub>Al) с некоторыми элементами периодической таблицы исследованы. Данные о высокотемпературной и электрохимической коррозии сплава Zn<sub>55</sub>Al с галлием, индием и таллием, используемые при анодной защите от коррозии стальных изделий, конструкций и сооружений в литературе практически отсутствуют.

*Вторая глава* диссертации «**Анодное поведение сплава Zn<sub>55</sub>Al, легированного галлием, индием и таллием, в коррозионно-активных средах**» посвящена исследованию влияния добавок галлия, индия и таллия на анодное поведение сплава Zn<sub>55</sub>Al, в кислых, нейтральных и щелочных средах.

Сплавы для исследования были синтезированы в печи электрического сопротивления типа СШОЛ в интервале температур 650÷750°C. Из полученных сплавов отливали в графитовую изложницу стержни диаметром 8 мм и длиной 140 мм. Перед исследованием торцевую часть образцов сплава зачищали наждачной бумагой, полировали, обезжиривали, тщательно промывали спиртом и затем погружали в исследуемом электролите. Температура в ячейке поддерживали постоянно 20°C с помощью термостата МЛШ-8.

Элементный состав сплавов контролировался микрорентгеноспектральным анализом на сканирующем электронном микроскопе SEM серии AIS2100 (Южная Корея). Точность определения содержания легирующего компонента сплава составляла  $\pm 10^{-3}$  от измеренной величины. Результаты анализа свидетельствуют, что составы полученных сплавов практически соответствуют заданному соотношению ингредиентов сплава (рис. 1).

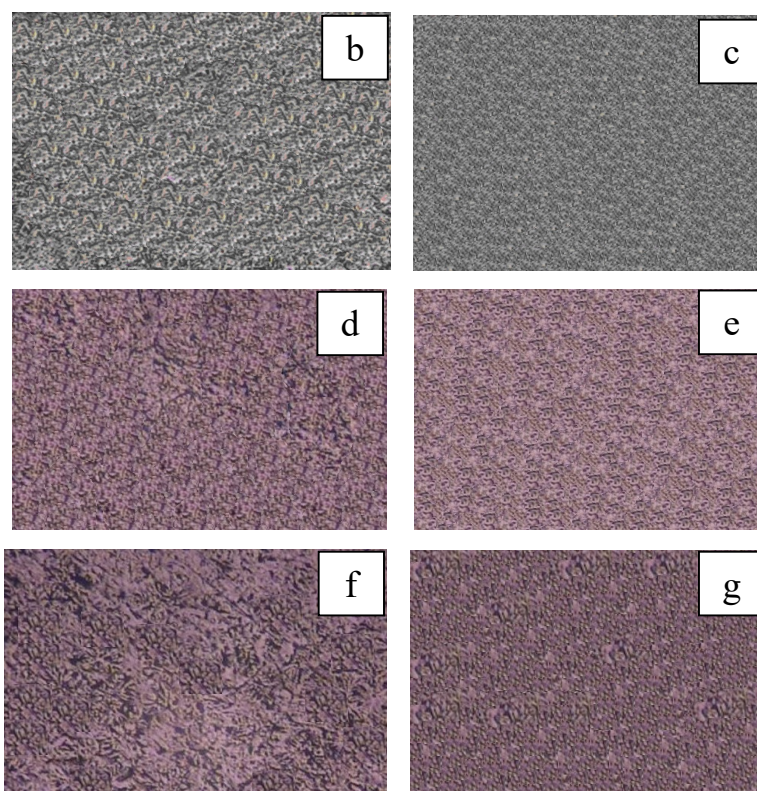
В качестве примера на рисунке 2 представлены изображений микроструктуры сплавов х500, снятые на электронном микроскопе ERGOLUX АМС. Добавки Ga, In и Tl оказывают модифицирующее влияние на структуру сплава Zn<sub>55</sub>Al, то есть с ростом содержания легирующих компонентов наблюдается уменьшение размера зёрен твердых растворов цинка в алюминии ( $\alpha$ -Al) и алюминия в цинке ( $\gamma$ -Zn) и их глобуляризации. Микроструктуры легированных сплавов с элементами подгруппы галлия (по 0.01 и 0.1 мас.%) характеризуется мелкозернистую структуру по сравнению с микроструктурой базового сплава Zn<sub>55</sub>Al.



	Units	Conc	Error-2sig	Intensity(c/s)	Line	Elt.
	wt%	44.500	11.001	351.51	Ka	Zn
	wt%	55.000	0.001	385.75	Ka	Al
	wt%	0.500	0.001	9.58	Ka	In
Total	wt%	100.0000				

**Рисунок 1.** Интенсивность рентгеноспектральной линии компонентов сплава Zn-55Al-0.5In.

a



**Рисунок 2.** Микроструктуры (x500) сплава Zn55Al (a), содержащего по 0.01 (b, d, f) и 0.1 (c, e, g) мас.% галлий (b, c), индий (d, e) и таллий (f, g).



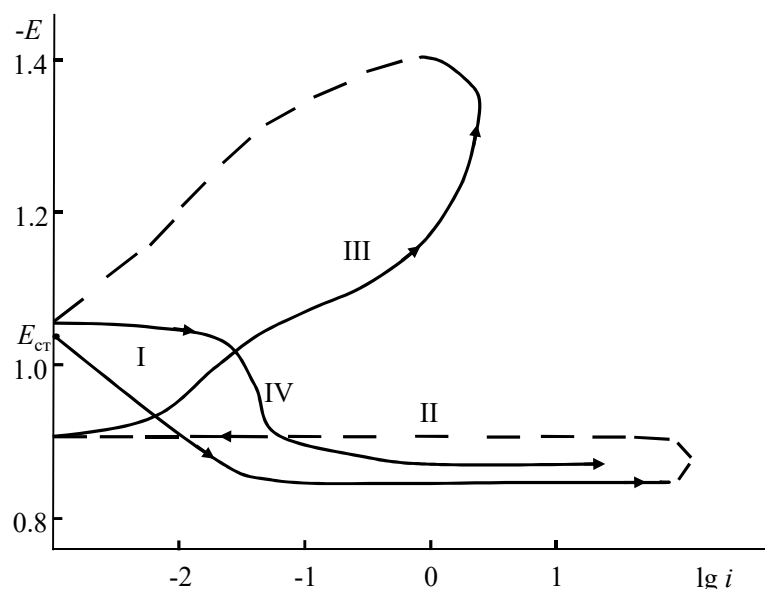
Потенциостатическое исследование влияния добавок галлия, индия и таллия на коррозионно-электрохимическое поведение сплава Zn55Al проводилось в кислой 0.001н.(pH=3), 0.01н.(pH=2), 0.1н.(pH=1) HCl, нейтральной 0.03-, 0.3- и 3%-ный NaCl (pH=7) и щелочной 0.001н.(pH=10), 0.01н.(pH=11), 0.1н.(pH=12) NaOH средах, в потенциодинамическом режиме со скоростью развёртки потенциала 2мВ/с на потенциостате ПИ-50.1.1.

Результаты исследования показывают, что потенциал свободной коррозии ( $-E_{св.кор.}$ , В), как для сплава Zn55Al, так и для легированных элементами подгруппы галлия сплавов (на примере галлий, табл. 1), во времени смещается в положительную область, по мере выдержки в кислой, нейтральной и щелочной средах. Зафиксировано, что формирование защитного оксидного слоя завершается к 30 минут от начала погружения образцов сплавов в электролит, и мало зависит от их химического состава. С ростом концентрации галлия в сплаве Zn55Al наблюдается смещение потенциала свободной коррозии в положительную область значений, в пределах концентрации легирующего компонента 0.01-0.1 мас.%. Подобная зависимость наблюдается во всех коррозионно-активных средах (табл. 1).

**Таблица 1** – Значение потенциала (х.с.э.) свободной коррозии ( $-E_{св.кор.}$ , В) сплава Zn55Al, легированного галлием, во времени, в различных средах

Среда	Добавки Ga в сплаве, мас.%	Время, мин							
		1/3	2/3	1	5	15	30	45	60
0.01н HCl	-	1.082	1.080	1.077	1.074	1.070	1.055	1.055	1.055
	0.01	1.038	1.037	1.036	1.025	1.020	0.963	0.963	0.963
	0.1	0.978	0.978	0.975	0.962	0.959	0.929	0.929	0.929
	1.0	1.053	1.052	1.050	1.046	1.041	1.006	1.006	1.006
0.3% NaCl	-	1.022	1.022	1.020	1.016	1.009	1.000	1.000	1.000
	0.01	0.997	0.995	0.993	0.988	0.985	0.946	0.946	0.946
	0.05	0.983	0.982	0.980	0.978	0.976	0.936	0.936	0.936
	0.1	0.965	0.961	0.960	0.957	0.954	0.910	0.910	0.910
	0.5	1.015	1.011	1.006	1.000	0.996	0.963	0.963	0.963
	1.0	1.022	1.020	1.018	1.016	1.016	0.984	0.984	0.984
0.01н NaOH	-	1.114	1.114	1.109	1.108	1.101	1.100	1.100	1.100
	0.01	1.022	1.022	1.020	1.019	1.019	0.923	0.923	0.923
	0.1	0.988	0.986	0.984	0.980	0.979	0.868	0.868	0.868
	1.0	1.056	1.053	1.051	1.049	1.049	0.949	0.949	0.949

При исследованиях образцы потенциодинамически поляризовали в положительном направлении от стационарного потенциала, установившегося при погружении до резкого возрастания тока в результате питтингообразования (рис. 3, кривая I). Затем образцы поляризовали в обратном направлении до потенциала – 1400 В (рис. 3, кривые II, III). Наконец, образцы поляризовали в положительном направлении (рис. 3, кривая IV), получив поляризационные кривые (на примере сплава Zn55Al с галлием, рис. 3), далее по кривым определяли электрохимические потенциалы сплавов (табл. 2).



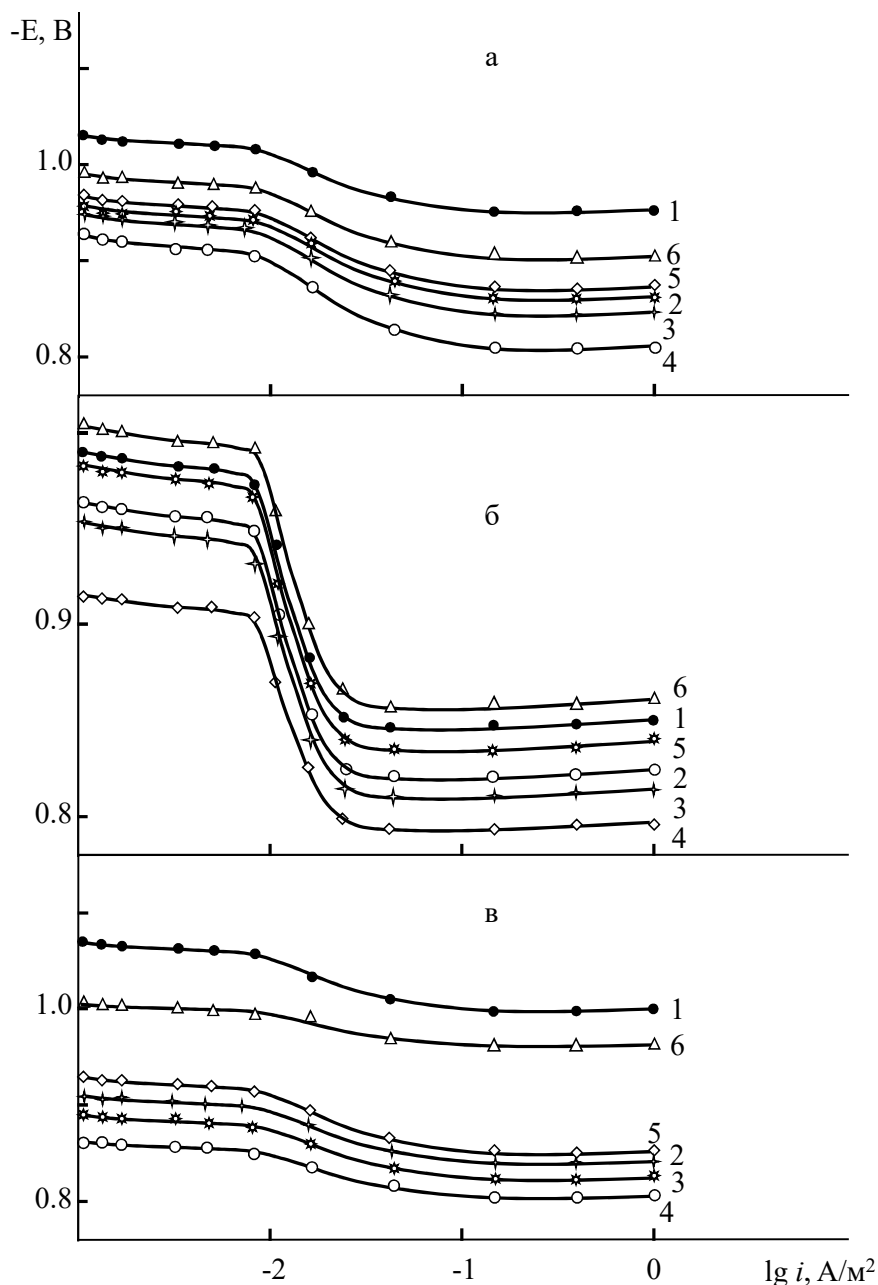
**Рисунок 3.** Потенциодинамические (2 мВ/с) анодные и катодные поляризационные кривые сплава Zn0.5Al, содержащего 1.0 мас.% галлия, в среде 3%-ного электролита NaCl.  $E$ – потенциал (В),  $i$ – плотности тока ( $A \cdot m^{-2}$ ).

Легирование сплава Zn55Al галлием в пределах концентрации (0.01-0.1 мас.%) способствует смещению потенциалов коррозии, питтингообразования и репассивации в положительную область. При повышении концентрации легирующего компонента (более 0.5 мас.%) в сплаве Zn55Al наблюдается сдвиг данных потенциалов в область отрицательных значений (табл. 2).

**Таблица 2.** Анодные характеристики сплава Zn55Al с галлием, в коррозионно-активных средах

Среда	Добавки Ga в сплаве, мас.%	Электрохимические потенциалы, В (х.с.э.)				Скорость коррозии	
		$-E_{св.кор.}$	$-E_{кор.}$	$-E_{п.о.}$	$-E_{реп.}$	$i_{корр.} \cdot 10^2$	$K \cdot 10^3$
						$A/m^2$	$г/м^2 \cdot ч$
0.01Н HCl	-	1.055	1.062	1.012	1.018	0.060	0.466
	0.01	0.963	0.963	0.866	0.880	0.022	0.171
	0.1	0.929	0.932	0.821	0.831	0.019	0.147
	0.5	0.971	0.987	0.876	0.888	0.025	0.194
	1.0	1.006	1.007	0.911	0.927	0.038	0.295
0.3% NaCl	-	1.000	1.020	0.880	0.890	0.033	0.256
	0.01	0.946	0.962	0.821	0.839	0.019	0.147
	0.1	0.910	0.912	0.791	0.807	0.013	0.101
	0.5	0.963	0.982	0.836	0.852	0.020	0.155
	1.0	0.984	1.002	0.856	0.864	0.022	0.171
0.01Н NaOH	-	1.100	1.107	0.940	0.948	0.075	0.583
	0.01	0.923	0.927	0.864	0.869	0.023	0.178
	0.1	0.868	0.869	0.759	0.780	0.019	0.147
	0.5	0.934	0.937	0.876	0.885	0.026	0.202
	1.0	0.949	0.952	0.953	0.958	0.027	0.210

Анодные ветви потенциодинамических поляризационных кривых исследованных сплавов, на примере сплава Zn55Al с галлием показывают как активную область растворения, так и пассивное состояние, что в целом характеризуют их коррозионную стойкость в различных средах (рис. 4). Положительное влияние галлия на анодное поведение сплава Zn55Al не может объясняться только ростом истинной поверхности анода или уплотнением защитного фазового слоя оксидов малорастворимыми продуктами коррозии. Стойкость сплава Zn55Al также зависит от изменения и модифицирования его структуры при легировании третьим компонентом.



**Рисунок 4.** Анодные ветви потенциодинамических (2 мВ/с) поляризационных кривых сплава Zn55Al (1), содержащего галлий, мас. %: 0.01 (2); 0.05 (3); 0.1 (4); 0.5 (5); 1.0 (6), в средах электролитов 0.001н HCl (а), 0.03% NaCl (б) и 0.001н NaOH (в).

Потенциалы свободной коррозии и питтингообразования исследованных сплавов по мере роста концентрации галлия, индия и таллия (до 0.1 мас.%) в сплаве Zn55Al смещаются в положительную область. Добавки легирующего компонента (более 0.5 мас.%) способствуют смещению данных потенциалов сплава Zn55Al в области отрицательных значений. С ростом агрессивности исследуемой среды наблюдается снижение указанных электрохимических потенциалов. При переходе от сплавов с галлием к индию и таллию потенциалы свободной коррозии и питтингообразования сплавов уменьшаются в кислых, нейтральных и щелочных средах (табл. 3-5).

**Таблица 3.** Потенциалы (х.с.э.) свободной коррозии и питтингообразования сплава Zn55Al с элементами подгруппы галлия, в кислой среде

Среда	Добавки Ga в сплаве, мас. %	-E <sub>св.кор.</sub>	-E <sub>по.</sub>	Добавки In в сплаве, мас. %	-E <sub>св.кор.</sub>	-E <sub>по.</sub>	Добавки Tl в сплаве, мас. %	-E <sub>св.кор.</sub>	-E <sub>по.</sub>
		В			В			В	
0.001н HCl	-	1.025	0.950	-	1.025	0.950	-	1.025	0.950
	0.01	0.951	0.861	0.01	1.008	0.942	0.01	1.012	0.946
	0.1	0.921	0.816	0.1	0.940	0.902	0.1	0.950	0.881
	0.5	0.962	0.871	0.5	1.013	0.917	0.5	1.020	0.971
	1.0	0.994	0.904	1.0	1.020	0.952	1.0	1.023	0.991
0.1н HCl	-	1.085	1.040	-	1.085	1.040	-	1.085	1.040
	0.01	0.975	0.876	0.01	1.033	0.937	0.01	1.035	0.966
	0.1	0.936	0.831	0.1	0.956	0.922	0.1	0.978	0.906
	0.5	0.989	0.881	0.5	1.045	0.967	0.5	1.057	0.986
	1.0	1.021	0.916	1.0	1.050	0.990	1.0	1.080	1.022

**Таблица 4.** Потенциалы (х.с.э.) свободной коррозии и питтингообразования сплава Zn55Al с элементами подгруппы галлия, в нейтральной среде

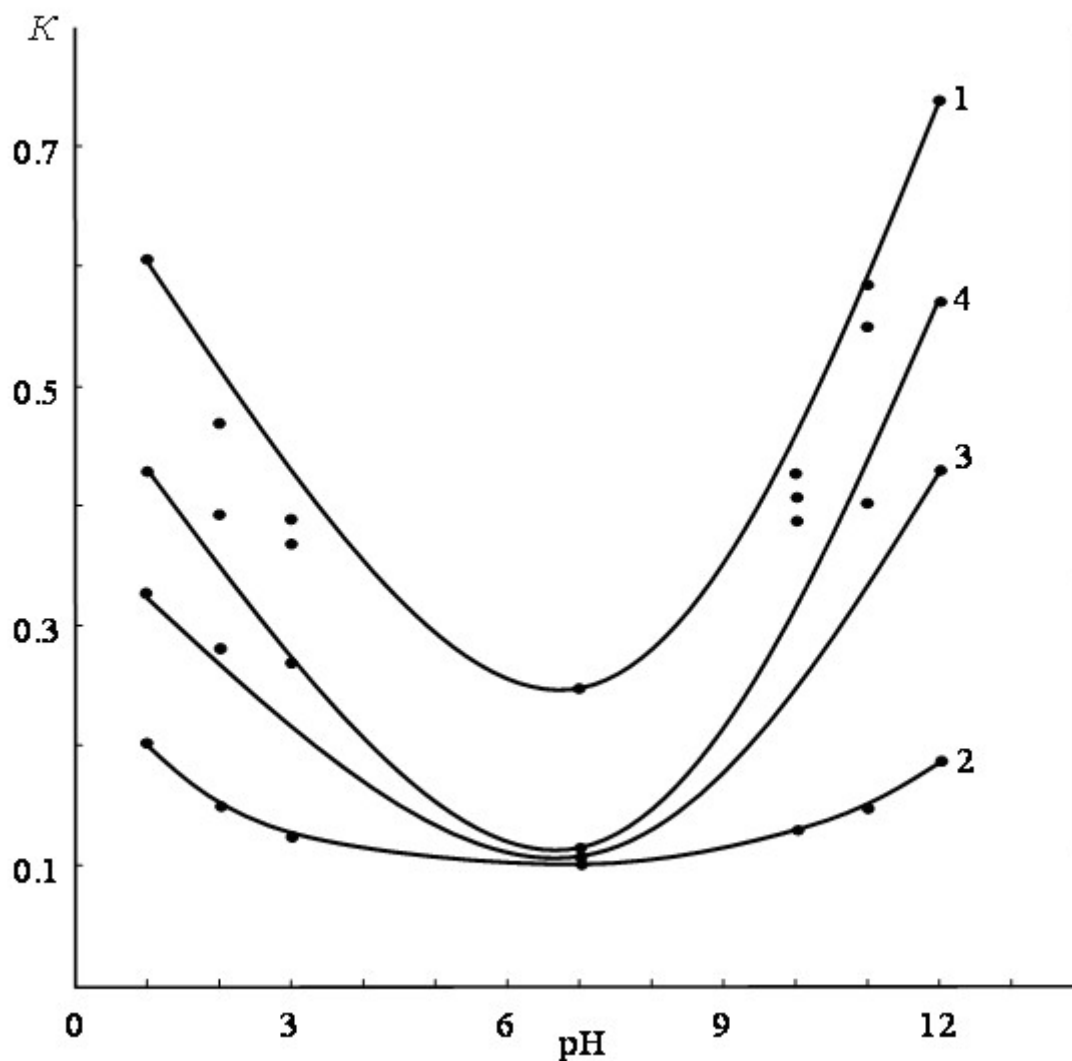
Среда	Добавки Ga в сплаве, мас. %	-E <sub>св.кор.</sub>	-E <sub>по.</sub>	Добавки In в сплаве, мас. %	-E <sub>св.кор.</sub>	-E <sub>по.</sub>	Добавки Tl в сплаве, мас. %	-E <sub>св.кор.</sub>	-E <sub>по.</sub>
		В			В			В	
0.03% NaCl	-	0.970	0.850	-	0.970	0.850	-	0.970	0.850
	0.01	0.951	0.826	0.01	0.970	0.837	0.01	0.990	0.856
	0.1	0.926	0.796	0.1	0.939	0.807	0.1	0.960	0.826
	0.5	0.968	0.841	0.5	0.983	0.852	0.5	1.008	0.871
	1.0	0.988	0.861	1.0	1.005	0.887	1.0	1.025	0.906
3% NaCl	-	1.020	0.900	-	1.020	0.900	-	1.020	0.900
	0.01	0.941	0.816	0.01	0.980	0.847	0.01	1.000	0.866
	0.1	0.911	0.786	0.1	0.950	0.817	0.1	0.975	0.836
	0.5	0.958	0.831	0.5	0.994	0.862	0.5	1.018	0.881
	1.0	1.037	0.870	1.0	1.015	0.887	1.0	1.035	0.906

**Таблица 5.** Потенциалы (х.с.э.) свободной коррозии и питтингообразования сплава Zn55Al с элементами подгруппы галлия, в щелочной среде

Среда	Добавки Ga в сплаве, мас. %	-E <sub>св.кор.</sub>	-E <sub>по.</sub>	Добавки In в сплаве, мас. %	-E <sub>св.кор.</sub>	-E <sub>по.</sub>	Добавки Tl в сплаве, мас. %	-E <sub>св.кор.</sub>	-E <sub>по.</sub>
		В			В			В	
0.001н NaOH	-	1.065	1.000	-	1.065	1.000	-	1.065	1.000
	0.01	0.908	0.842	0.01	1.017	1.007	0.01	1.050	1.001
	0.05	0.886	0.828	0.05	0.990	0.817	0.05	1.015	0.963
	0.1	0.856	0.808	0.1	0.976	0.792	0.1	1.000	0.902
	0.5	0.921	0.856	0.5	1.020	0.842	0.5	1.077	1.021
	1.0	0.985	0.961	1.0	1.045	0.887	1.0	1.087	1.033
0.01н NaOH	-	1.100	0.940	-	1.100	0.940	-	1.100	0.940
	0.01	0.923	0.864	0.01	1.027	0.852	0.01	1.058	1.006
	0.05	0.904	0.838	0.05	1.002	0.822	0.05	1.026	0.966
	0.1	0.868	0.759	0.1	0.985	0.797	0.1	1.007	0.906
	0.5	0.934	0.876	0.5	1.033	0.892	0.5	1.080	1.017
	1.0	0.949	0.953	1.0	1.048	1.012	1.0	1.095	1.026
0.1н NaOH	-	1.130	1.075	-	1.130	1.075	-	1.130	1.075
	0.01	0.944	0.876	0.01	1.043	0.857	0.01	1.075	1.026
	0.05	0.912	0.856	0.05	1.023	0.835	0.05	1.042	0.979
	0.1	0.876	0.766	0.1	1.000	0.814	0.1	1.020	0.919
	0.5	0.949	0.897	0.5	1.057	0.905	0.5	1.094	1.029
	1.0	0.970	0.913	1.0	1.070	0.929	1.0	1.122	1.044

Оценка стойкости сплава Zn55Al с элементами подгруппы галлия к питтинговой коррозии может быть осуществлена путём сопоставления значений стационарных потенциалов свободной коррозии и питтингообразования в одних и тех же условиях исследований. Исследования свидетельствуют об улучшении коррозионной стойкости сплава Zn55Al при легировании галлием, индием и таллием, то есть результаты показывают о способности сплавов к самозалечиванию возникающих в результате коррозии питтинговых поражений (табл. 3-5).

Добавки легирующих элементов подгруппы галлия уменьшают скорость коррозии сплава Zn55Al в 2-3 раза, соответственно в кислой, нейтральной и щелочной среде при различных значениях pH среды. При переходе от исходного сплава Zn55Al к легированным таллием сплавам, далее к индию и галлием сплавов наблюдается снижение скорости коррозии исследованных сплавов, что коррелируется со свойствами элементов подгруппы галлия (рис. 5). При легировании сплава Zn55Al указанными элементами увеличивается электрохимическая неоднородность, и его коррозионная стойкость определяется природой и количеством легирующих элементов.



**Рисунок 5.** Зависимость скорости коррозии  $K \cdot 10^3 (\text{г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1})$  сплава Zn55Al (1), содержащего по 0.1 мас.% галлия (2), индия (3) и таллия (4) от pH среды.

Скорость коррозии сплавов, легированных элементами подгруппы галлия в 2-3 раза меньше, чем у сплава Zn55Al. Особенно, положительно влияют добавки галлия и индия в пределах изученной концентрации, то есть повышают коррозионную стойкость исходного сплава в кислых, нейтральных и щелочных средах. Дальнейший рост концентрации  $> 0.1$  мас.% Tl несколько увеличивает скорость коррозии сплава Zn55Al, но по абсолютной величине он меньше, чем у исходного сплава. Такая зависимость наблюдается во всех исследованных средах (рис. 5).

В целом, проведенные исследования показали, что добавки галлия, индия и таллия в количествах 0.01-0.1 мас.% повышают анодную устойчивость исходного сплава Zn55Al в кислой, нейтральной и щелочной средах. Разработанные оптимальные составы сплавов могут использоваться в качестве покрытий при анодной защите от коррозии металлических изделий, особенно стальных изделий, конструкций и сооружений в различных агрессивных средах.

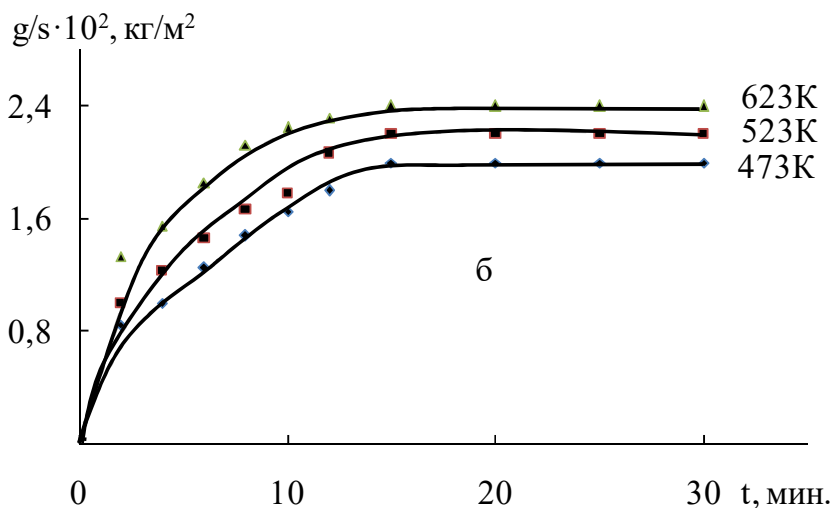
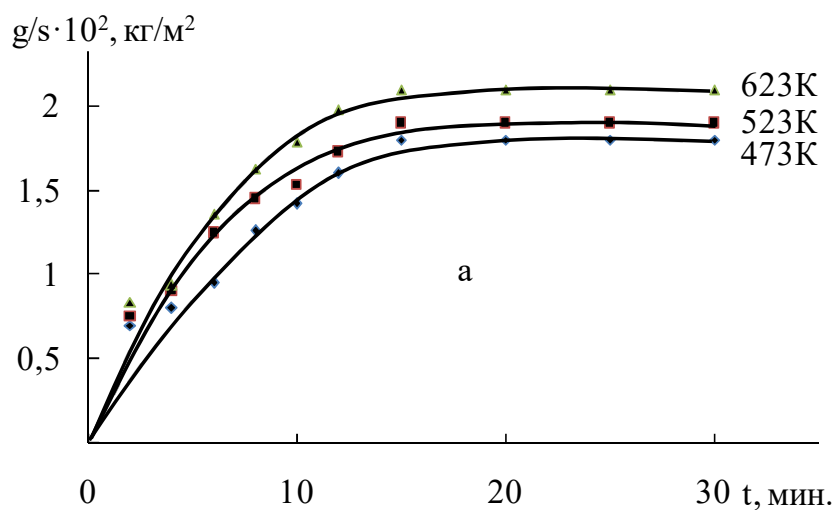
**В третьей главе** диссертации «**Кинетика высокотемпературного окисления сплава Zn55Al, легированного галлием, индием и таллием, в твердом состоянии**» приведены результаты исследования влияния легирующих добавок галлия, индия и таллия различной концентрации на кинетику высокотемпературного окисления цинково-алюминиевого сплава Zn55Al, в атмосфере воздуха.

Кинетику окисления сплавов в твёрдом состоянии изучали термогравиметрическим методом. Исследования проводились на установке, состоящей из печи угольного сопротивления с чехлом из оксида алюминия. Для создания контролирующей атмосферы верхний конец чехла закрывается водоохлаждающимися крышками, имеющими отверстия для газопроводящей трубки, термопары и тигля с исследуемым сплавом, подвешенного на платиновой проволоке к пружине из молибденовой проволоки. Изменение веса сплавов фиксировали по растяжению пружины с помощью катетометра КМ-8. Тигли диаметром 18-20 мм, высотой 25-26 мм перед опытом подвергались прокаливанию при температуре 1000-1200°C в окислительной среде до постоянного веса. По окончании опытов систему охлаждали, тигель с содержимым взвешивали и определяли реакционную поверхность. Затем образовавшуюся оксидную плёнку снимали с поверхности образца и изучали её методом рентгенофазового анализа. Для получения информации о составе фаз в продуктах окисления использовали метод рентгенофазового исследования порошка. Рентгенофазовый анализ проводили на дифрактометре ДРОН-2.0, а дифрактограммы снимали с использованием медного  $K_{\alpha}$ -излучения.

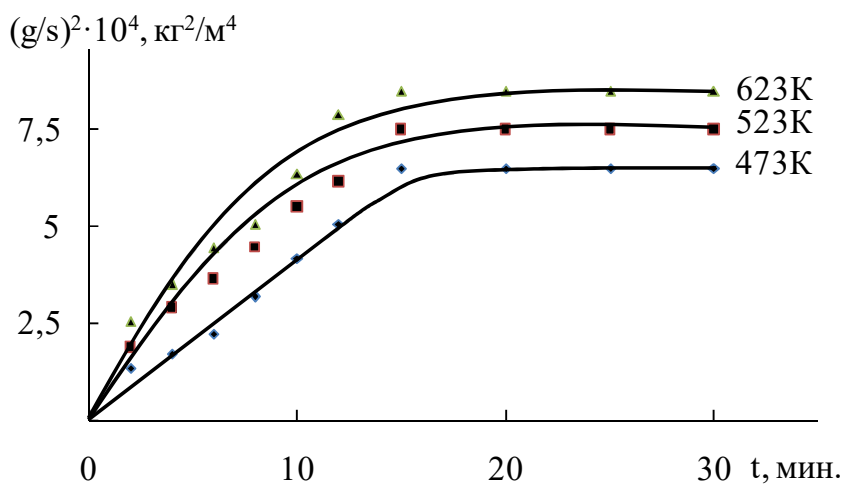
Для исследования процесса высокотемпературного окисления были получены образцы сплава Zn55Al с содержанием галлия, индия и таллия в диапазоне 0.01-1.0 мас.%. Для изучения кинетики высокотемпературного окисления сплавов в воздушной среде измеряли увеличение удельной массы образца, вследствие роста оксидной плёнки во времени, при постоянных температурах 473, 523 и 623 К. Истинную скорость окисления вычисляли по касательным, проведённым от начала координат к кривым по формуле:  $K=g/s \cdot \Delta t$ , а значение эффективной энергии активации процесса высокотемпературного окисления вычисляли по тангенсу угла наклона прямой зависимости  $\lg K - 1/T$ . Результаты исследования представлены на рис. 6-9.

Приведённые на рисунке 7 квадратичные кинетические кривые процесса высокотемпературного окисления на примере сплава Zn55Al с 0.5 мас.% галлием, показывают, что процесс окисления в начальных стадиях протекает по линейному, далее к 12-15 мин по гиперболическому закону, о чём свидетельствует формирование защитной оксидной плёнки, которая заканчивается к 15 минутам взаимодействия с кислородом воздуха. Направление кинетических кривых подчеркивает гиперболический характер механизма окисления исследуемых сплавов. Об этом свидетельствует непрямолинейный характер кривых в координатах  $(g/s)^2-t$ , а также аналитические зависимости  $y = Kt^n$ , где  $n = 2 \div 4$  (табл. 6). Рассчитанные из кинетических кривых значения истинной скорости окисления сплава Zn55Al, легированного элементами подгруппы галлия, на примере сплавов с галлием в

зависимости от температуры и состава исследованных сплавов приведены в таблице 7.



**Рисунок 6.** Кинетические кривые процесса окисления сплава Zn55Al (а), содержащего 0.01 мас.% галлий (б).



**Рисунок 7.** Квадратичные кривые процесса высокотемпературного окисления сплава Zn55Al, содержащего 0.5 мас.% галлий.



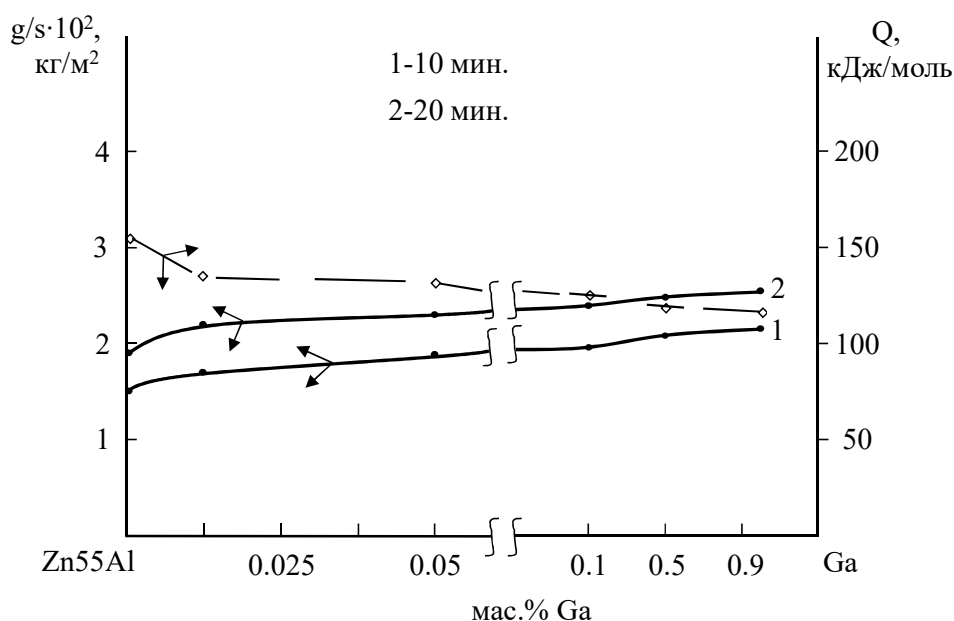
**Таблица 6.** Результаты математической обработки кинетических кривых процесса высокотемпературного окисления сплава Zn55Al, легированного элементами подгруппы галлия, в твердом состоянии

Добавки легирующего компонента в сплаве, мас. %	Температура окисления, К	Полиномы кинетических кривых окисления сплавов	Коэффициент корреляции ( $R^2$ )
-	473	$y = 0.001x^3 - 0.008x^2 + 0.203x - 0.108$	0.997
	523	$y = 0.001x^3 - 0.016x^2 + 0.3x - 0.086$	0.985
	623	$y = 0.001x^3 - 0.017x^2 + 0.281x - 0.081$	0.985
0.5Ga	473	$y = 0.001x^4 - 0.001x^3 + 0.030x^2 - 0.241x + 1.683$	0.994
	523	$y = 0.001x^4 - 0.003x^3 + 0.004x^2 - 0.008x + 1.477$	0.982
	623	$y = 0.001x^4 - 0.004x^3 + 0.005x^2 - 0.007x + 1.465$	0.991
0.5In	473	$y = 0.001x^4 - 0.001x^3 + 0.045x^2 - 0.285x + 1.710$	0.995
	523	$y = 0.001x^4 - 0.003x^3 + 0.004x^2 - 0.009x + 1.523$	0.982
	623	$y = 0.001x^4 - 0.004x^3 + 0.005x^2 - 0.008x + 1.487$	0.991
0.5Tl	473	$y = 0.001x^4 - 0.044x^3 + 0.083x^2 - 0.089x + 1.904$	0.989
	523	$y = 0.002x^4 - 0.007x^3 + 0.122x^2 - 0.340x + 3.245$	0.987
	623	$y = 0.003x^4 - 0.087x^3 + 0.075x^2 - 0.407x + 2.491$	0.994

**Таблица 7.** Кинетические и энергетические параметры процесса окисления сплава Zn55Al с галлием, в твердом состоянии

Добавки Ga в сплаве, мас. %	Температура окисления, К	Истинная скорость окисления $K \cdot 10^4$ , $кг \cdot м^{-2} \cdot с^{-1}$	Эффективная энергия активации, кДж/моль
-	473	3.04	154.4
	523	3.32	
	623	3.73	
0.01	473	4.27	134.7
	523	4.53	
	623	4.87	
0.05	473	4.48	131.5
	523	4.84	
	623	5.05	
0.1	473	4.78	127.0
	523	5.11	
	623	5.33	
0.5	473	5.18	121.8
	523	5.44	
	623	5.79	
1.0	473	5.36	117.6
	523	5.67	
	623	5.92	

Динамику изменения истинной скорости окисления и эффективной энергии активации процесса окисления исследуемых сплавов можно наблюдать по изохроне окисления сплава Zn55Al с различным содержанием галлия, который построен при температуре 523 К, соответствующий 10 и 20 минутам процесса окисления. Кривые процесса окисления характеризуются монотонным повышением скорости окисления и снижением энергии активации при содержании легирующего компонента в исходном сплаве Zn55Al. Добавки галлия в пределах изученной концентрации несколько увеличивают окисляемость исходного сплава (рис. 8).

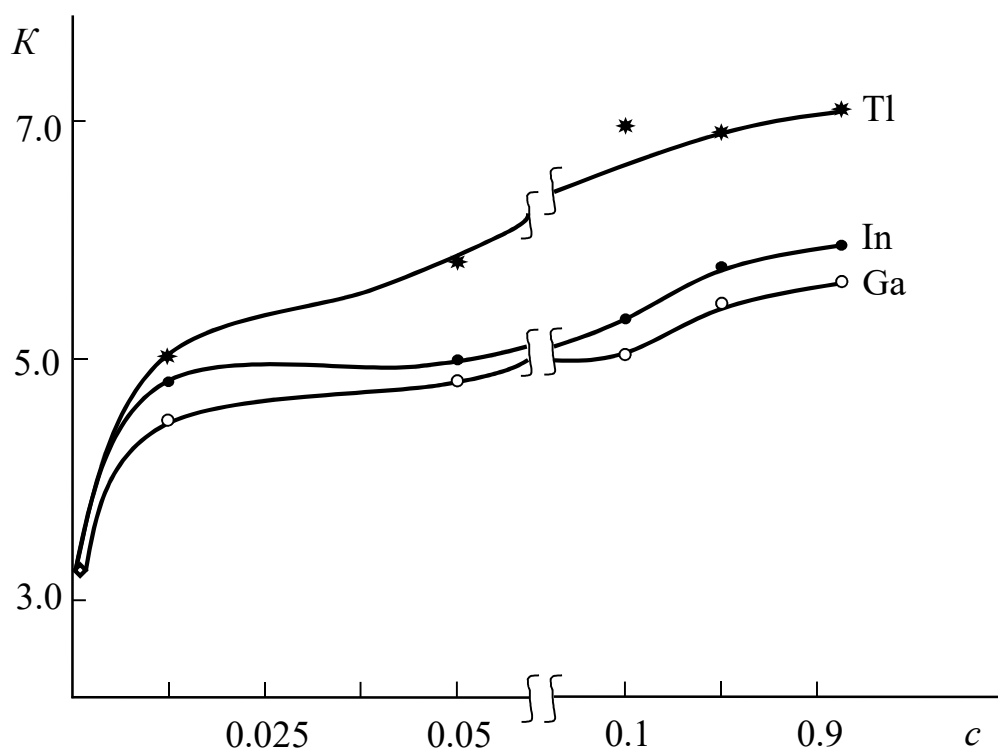


**Рисунок 8.** Изохроны окисления (523К) сплава Zn55Al с галлием.

Для сравнительного анализа в обобщенном виде в таблице 8 и на рисунке 9 приведены результаты исследования влияния добавок галлия, индия и таллия на кинетику процесса высокотемпературного окисления сплава Zn55Al. Видно, что при переходе от сплавов легированных галлием к сплавам с индием, далее к сплавам с таллием наблюдается повышение истинной скорости окисления исследованных сплавов, что сопровождается уменьшением эффективной энергии активации процесса окисления (табл. 8, рис. 9).

**Таблица 8.** Сравнение зависимости эффективной энергии активации процесса окисления сплава Zn55Al от содержания элементов подгруппы галлия

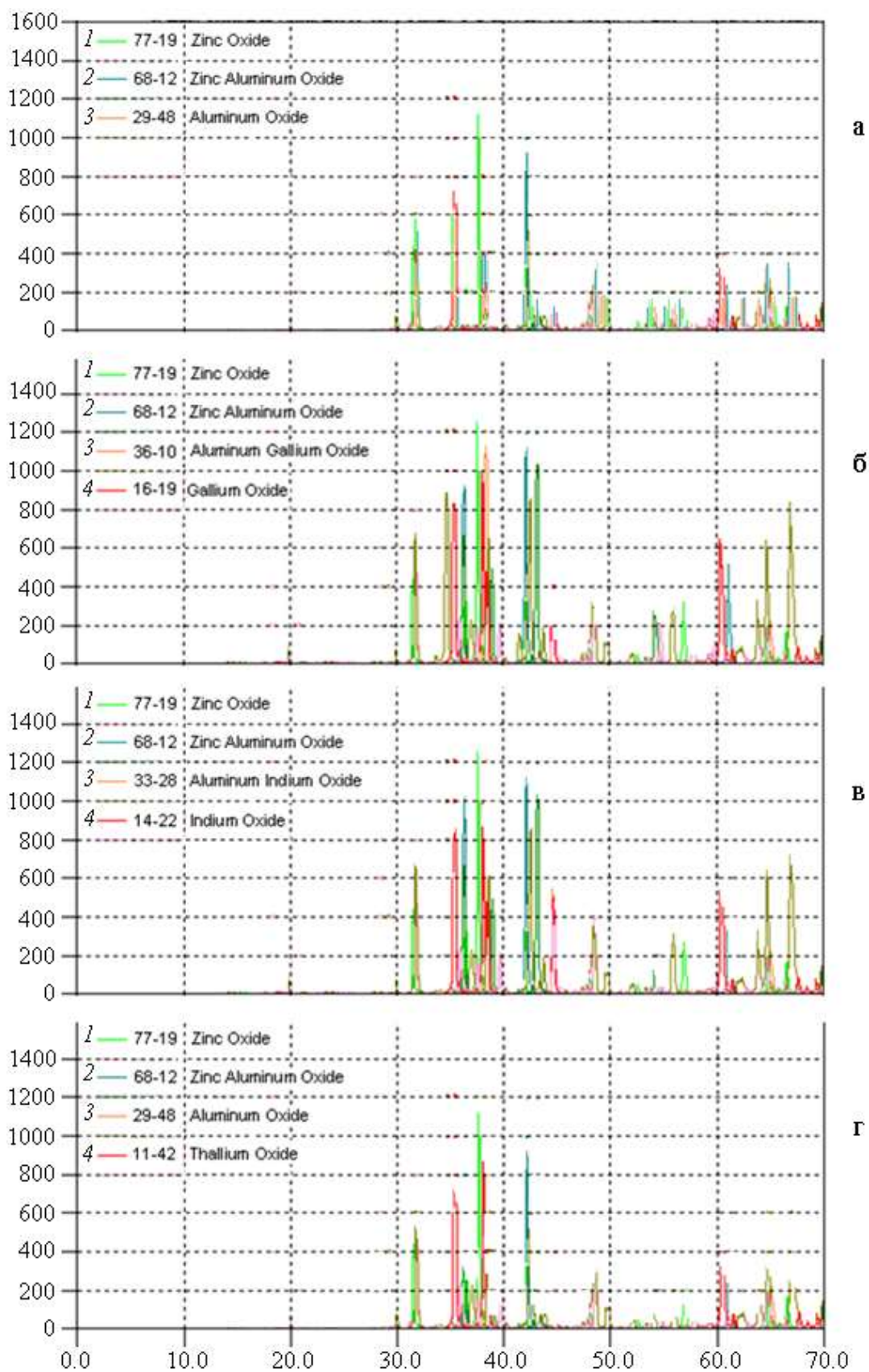
Температура окисления, К	Легирующий компонент сплава Zn55Al	Эффективная энергия активации, кДж/моль					
		Содержание добавки, мас.%					
		-	0.01	0.05	0.1	0.5	1.0
473	-	154.4	-	-	-	-	-
	Ga	-	134.7	131.5	127.0	121.8	117.6
523	In	-	132.8	128.5	124.4	118.6	115.9
623	Tl	-	126.3	122.0	117.7	111.4	107.9



**Рисунок 9.** Сравнение зависимости изменения средней истинной скорости окисления  $K \cdot 10^4$  ( $\text{кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1}$ ) сплава Zn55Al от содержания элементов подгруппы галлия.

В качестве примера на рисунке 10 представлены дифрактограммы продуктов окисления сплавов. Выявлено, что при окислении исследованных сплавов образуются оксиды  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{Ga}_2\text{O}_3$ ,  $\text{In}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Tl}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZnAl}_2\text{O}_4$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Ga}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{In}_2\text{O}_3$ . Образование данных оксидов и взаимодействие между ними связано с многими факторами, в том числе с температурой, активностью компонентов сплава, свободной энергией и т.д. Также, если объём образующего оксида меньше, чем объём металла, то можно ожидать получения пористой плёнки. В данном случае процесс окисления протекает в диффузионном режиме. При диффузии атомов металла сквозь оксидную плёнку наружу зоной роста плёнки будет внешняя поверхность плёнки и, наоборот, если сквозь плёнку диффундирует, главным образом, кислород, то зоной роста плёнки будет граница между плёнкой и металлом.

В целом, термогравиметрическим методом исследовано взаимодействие сплава Zn55Al, легированного элементами подгруппы галлия с кислородом воздуха при температурах 473, 523 и 623 К, в твёрдом состоянии. Определены кинетические и энергетические параметры процесса высокотемпературного окисления сплавов. Установлено, что окисление сплавов подчиняется гиперболическому закону, а истинная скорость имеет порядок  $10^{-4}$ . Показано, что добавки галлия, индия и таллия в диапазоне концентрации 0.01-0.1 мас.% несколько увеличивают окисляемость сплава Zn55Al и соответственно рекомендуются в качестве анодных защитных покрытий стальных изделий, конструкций и сооружений от коррозионного разрушения.



**Рисунок 10.** Дифрактограммы продуктов окисления сплава Zn55Al (а), содержащего по 0.01% галлия (б), индия (в) и таллия (г): 1 – ZnO; 2 – ZnAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>; 3 – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 4 – Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Tl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

## ВЫВОДЫ

1. Потенциостатическим методом исследования в потенциодинамическом режиме (2 мВ/с), в коррозионно-активных средах HCl, NaCl, NaOH показано, что скорость коррозии сплава Zn55Al уменьшается в 2-3 раза при легировании его галлием, индием и таллием (0.01-0.1 мас.%).

2. Установлены закономерности изменения основных коррозионно-электрохимических характеристик (потенциалов коррозии, питтингообразования и репассивации) сплавов от содержания легирующих компонентов и pH коррозионной среды.

3. Методом термогравиметрии исследована влияние добавок галлия, индия и таллия на кинетику окисления сплава Zn55Al, в твердом состоянии, кислородом воздуха. Установлен гиперболический характер процесса окисления сплавов. Определено, что легирующие компоненты в пределах 0.01-0.1 мас.% несколько увеличивают окисляемость сплава Zn55Al.

4. Выявлено, что сплав Zn55Al с таллием имеет минимальные величины энергии активации и наибольшее значение скорости окисления, а сплавы, легированные галлием - максимальные значения эффективной энергии активации и наименьшей скоростью окисления. Сплав Zn55Al с индием занимает промежуточное положение.

5. Фазовый состав продуктов окисления сплава Zn55Al, содержащего элементов подгруппы галлия и их роль в процессе окисления определены методом рентгенофазового анализа. Показано, что продукты окисления изученных сплавов состоят из оксидов  $Al_2O_3$ , ZnO,  $Ga_2O_3$ ,  $In_2O_3$ ,  $Tl_2O_3$ ,  $ZnAl_2O_4$ ,  $Al_2O_3 \cdot Ga_2O_3$ ,  $Al_2O_3 \cdot In_2O_3$ .

6. Микроструктуры исследованных сплавов изучены на микроскопе ERGOLUX АМС. Показано, что сплавы систем Zn55Al-Ga(In, Tl) имеют мелкозернистую структуру, чем сплав Zn55Al. Оптимальные составы, разработанных новых коррозионностойких сплавов в качестве анодных покрытий, защищены малым патентом Республики Таджикистан № TJ 1116.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ

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

1. **Сироджидинов М.Э.** Исследование анодного поведения сплава Zn55Al с галлием, в кислых, нейтральных и щелочных средах / М.Э. Сироджидинов, И.Н. Ганиев, Дж.Х. Шарипов, З.Р. Обидов // **Вопросы материаловедения. SCOPUS, Web of Science.** – 2022. – № 3 (111). – С. 79-84.

2. **Сироджидинов М.Э.** Влияние таллия на анодное поведение сплава Zn55Al, в кислых, нейтральных и щелочных средах / М.Э. Сироджидинов, И.Н. Ганиев, Дж.Х. Шарипов, З.Р. Обидов // **Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна (СПГУТД). Серия 1. Естественные и технические науки. РИНЦ.** – 2022. – №3. – С. 120-125.

3. **Sirojiddinov M.E.** Oxidation of Zn55Al alloy doped with gallium / M.E.

Sirojiddinov, I.N. Ganiev, P.R. Pulotov, Z.R. Obidov // **UNIVERSUM – технические науки. Crossref, Ulrichsweb.** – 2022. – No 3-6(96). – P. 53-55.

4. **Сиродждинов М.Э.** Окисление цинково-алюминиевого сплава Zn55Al, легированного таллием // **Вестник педагогического университета. Серия естественных наук. РИНЦ.** – 2021. – № 3-4 (11-12). – С. 357-361.

5. Obidov Z.R. The influence of different media on high-temperature electrochemical of Zn55Al alloy doped with indium / Z.R. Obidov, **М.Е. Sirodzhidinov**, I.N. Ganiev, R.N. Amini // **Trends in physical chemistry. CAS.** – 2020. – N 2. – P. 30-37.

6. **Сиродждинов М.Э.** Влияние добавок индия на анодное поведение сплава Zn55Al, в кислой среде / М.Э. Сиродждинов, И.Н. Ганиев, Д.Х. Шарипов, З.Р. Обидов // **Вестник Саратовского государственного технического университета. РИНЦ.** – 2023. – № 2 (97). – С. 76-84.

#### *Статьи, опубликованные в других научных рецензируемых журналах:*

7. **Сиродждинов М.Э.** Кинетика окисления цинково-алюминиевого сплава Zn55Al, легированного галлием, в твёрдом состоянии / М.Э. Сиродждинов, З.Р. Обидов, И.Н. Ганиев, О.Х. Ниёзов // **Наука и инновация. Серия геологических и технических наук. ТНУ. РИНЦ.** – 2021. – № 1. – С. 86-92.

8. **Сиродждинов М.Э.** Окисление цинково-алюминиевого сплава Zn55Al, легированного индием / М.Э. Сиродждинов, И.Н. Ганиев, А.М. Сафаров, З.Р. Обидов // **Вестник Бохтарского государственного университета им. Н. Хусрава. Серия естественных наук. РИНЦ.** – 2021. – № 2. – С. 58-64.

9. **Сиродждинов М.Э.** Влияние добавок индия на коррозионное поведение сплава Zn55Al, в нейтральной среде / М.Э. Сиродждинов, И.Н. Ганиев, З.Р. Обидов, О.Х. Ниёзов // **Наука и инновация. Серия геологических и технических наук. ТНУ. РИНЦ.** – 2020. – № 2. – С. 119-124.

#### *Изобретения:*

10. Малый патент Республики Таджикистан № ТЈ 1116. Цинк-алюминиевый сплав / **М.Э. Сиродждинов**; заявитель и патентообладатель: М.Э. Сиродждинов И.Н. Ганиев, З.Р. Обидов, Ф.А. Рахимов, и др. / № 2001423; заявл. 10.04.20, опубл. 14.10.20, бюл. 164, 2020. – 3 с.

#### *Статьи, опубликованные в материалах конференций:*

11. **Сиродждинов М.Э.** Анодное поведение сплава Zn55Al с индием в нейтральной среде / М.Э. Сиродждинов, И.Н. Ганиев, З.Р. Обидов // Сб. матер. Межд. науч.-практ. конф. «Ускоренная индустриализация – основной фактор развития Таджикистана». Институт энергетики Таджикистана. – Кушониён. – 2019. – С. 377-380.

12. **Сиродждинов М.Э.** Анодное поведение цинк-алюминиевого сплава Zn55Al, легированного таллием, в щелочной среде / М.Э. Сиродждинов, И.Н. Ганиев, З.Р. Обидов, Ш. Шарипов // Сб. матер. Межд. науч.-практ. конф.

«Актуальные вопросы естественных наук». Российско-Таджикский (Славянский) университет. – Душанбе. – 2020. – С. 244-245.

13. **Сиродждинов М.Э.** Окисление сплава Zn55Al с галлием / М.Э. Сиродждинов, И.Н. Ганиев, З.Р. Обидов // Сб. матер. III Межд. науч.-практ. конф. «Развитие химической науки и области их применения». Таджикский национальный университет. – Душанбе. – 2021. – С. 70-74.

14. **Сиродждинов М.Э.** Коррозионное поведение сплава Zn55Al с галлием в среде NaOH / М.Э. Сиродждинов, И.Н. Ганиев, И.Т. Амонзода, З.Р. Обидов // Сб. матер. Межд. науч.-практ. конф. «Роль Российско-Таджикского (Славянского) университета в становлении и развитии науки и инновационного образования в Республике Таджикистан». Российско-Таджикский (Славянский) университет. – Душанбе. – 2021. – Ч.2. – С. 38-41.

