

**ДОНИШГОҲИ ТЕХНИКИИ ТОЧИКИСТОН  
БА НОМИ АКАДЕМИК М.С.ОСИМӢ**

**ИНСТИТУТИ ХИМИЯИ БА НОМИ В.И. НИКИТИНИ  
АКАДЕМИЯИ МИЛЛИИ ИЛМҲОИ ТОЧИКИСТОН**

УДК 669.5: 620.193

*Бо ҳуқуқи дастнавис*

**АМИНОВ Фируз Миррахимович**

**ТАЪСИРИ ТИТАН ВА СИРКОНИЙ БА ХОСИЯТҲОИ  
ХӮЛАҲОИ РӮҲИИ  $Zn_5Al$  ВА  $Zn_{55}Al$**

**АВТОРЕФЕРАТИ**

**рисола барои дарёфти дараҷаи илмии  
номзади илмҳои техникӣ  
аз рӯи ихтисоси**

**05.02.01 – Маводшиносӣ (05.02.01.02.-саноати мошинсозӣ)**

**Душанбе – 2023**

Рисолаи номзадӣ дар озмоишгоҳи кафедраи «Масолехшиносӣ, мошинҳо ва таҷҳизотҳои металлургӣ»-и ДТТ ба номи акад. М.С. Осимӣ ва озмоишгоҳи «Маводҳои ба коррозия устувор»-и Институти химияи ба номи В.И. Никитини Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон иҷро гардидааст.

**Роҳбари илмӣ:** **Алиев Ҷамшед Насридинович,**  
номзади илм-ҳои техникӣ, дотсенти кафедраи «Масолехшиносӣ, мошинҳо ва таҷҳизотҳои металлургӣ» -и ДТТ ба номи акад. М.С. Осимӣ

**Мушовири илмӣ:** **Ғаниев Изатулло Наврузович,**  
доктори илмҳои химия, профессор, академики Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон

**Муқарризони расмӣ:** **Рузиев Ҷура Раҳимназарович,**  
доктори илмҳои техникӣ, профессор, профессори кафедраи химияи амалии донишгоҳи миллии Тоҷикистон  
**Абдуназаров Сунатулло Сабзаалиевич,**  
номзади илмҳои техникӣ, декани факултети электроэнергетикии донишкадаи энергетикӣ Тоҷикистон

**Муассисаи пешбар:** Донишгоҳи аграрии Тоҷикистон ба номи Шириншох Шохтемур

Ҳимояи рисолаи номзадӣ рӯзи «\_\_» \_\_\_\_\_ соли 20\_\_\_\_, соати 9<sup>00</sup> дар ҷаласаи Шӯрои диссертатсионӣ 6Д.КOA-009 назди Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ баргузор мегардад. Суроға: 734042, ш. Душанбе, хиёбони академикҳо Раҷабовҳо, 10.  
E-mail: [adliya69@mail.ru](mailto:adliya69@mail.ru)

Бо матни пурраи рисолаи номзадӣ ва автореферат метавонед дар китобхонаи илмӣ ва сомонаи интернетии [http: www.ttu.tj](http://www.ttu.tj) -и Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ шинос шавед.

Автореферати рисола санаи «\_\_» \_\_\_\_\_ соли 20\_\_ аз рӯи феҳристи пешниҳодшуда тақсим карда шудааст.

**Котиби илмӣ**  
**Шӯрои диссертатсионӣ,**  
номзади илмҳои техникӣ, дотсент

**Бабаева А.Х.**

## ТАВСИФИ УМУМИИ КОР

### *Мубрамӣ ва зарурияти гузаронидани тадқиқот оиди мавзӯи рисола.*

Тарақиёти илмию техникий замони муосир инкишофи баланди металлургияи рангаро таъмин менамояд. Дар ҳаҷми умумии истеҳсоли металлҳои рангаи таъиноти истеҳсолотӣ рӯҳ ҷойи чорумро ишғол менамояд. Рӯҳ ва хӯлаҳо дар асоси он, пайвастагиҳои рӯҳии гуногун бо шарофати хосиятҳои махсус истифодашавии васеъро ҳамчун масолеҳҳои конструксионӣ ва ғайри конструксионӣ дарёфт намудаанд.

Ба сифати масолеҳи конструксионӣ хӯлаҳои рӯҳӣ алалхусус барои асбобсозӣ, дар саноатҳои полиграфӣ ва авиатсионӣ, дар саноати автомобилсозӣ, дар киштисозӣ, барои тайёр кардани молҳои хочагии рӯзгор истифода бурда мешаванд. Ба сифати масолеҳи ғайри конструксионӣ хӯлаҳои рӯҳӣ барои рехтани анодҳо-протекторҳо, барои тайёр кардани лаҳимҳои васлқунанда ҳангоми истеҳсоли подшипникҳо ва элементҳои галваникӣ, ҳамчун рӯйпӯши варақаҳои пӯлодӣ истифода бурда мешаванд.

Хӯлаҳои рӯҳӣ-алюминий бештар барои бо онҳо рӯйпӯш кардани варақаҳои металлӣ, тайёр кардани нимашёҳо ва рехтаҳои мукарнас васеъ истифода бурда мешаванд. Дар солҳои охир хӯлаҳо дар асоси рӯҳ барои тайёр кардани протекторҳои рехтаҳосилшуда, ки барои муҳофизати киштиҳои баҳрӣ ва иншоотҳои металлӣ аз зангзанӣ зарур мебошанд, истифодашавии васеъ пайдо намудаанд.

*Дарачаи омӯхта шудани масъалаи ҳалталаби илмӣ, асосҳои тадқиқоти назариявӣ ва методологӣ.* Миёни металлҳое, ки дар саноатҳои гуногун истифода бурда мешаванд рӯҳ ҷойи намоёнро ишғол менамояд. Ҳамчун масолеҳи конструксионӣ рӯҳи ҷавҳарониданашуда истифодашавии васеъро пайдо накардааст, чунки маҷмӯи хосиятҳои механикӣ, физикӣ ва технологияи нокифояи мусоидро доро мебошад. Лекин ҷавҳаронидани иловагии рӯҳ бо элементҳои гуногун хосиятҳои дар боло зикрнамуда ва тавсифҳои онро ба таври қатъӣ баланд мебардорад.

Бинобар дар адабиётҳо мавҷуд набудани маълумот оиди таъсири титан ва сирконий ба хосиятҳои физикаи гармо ва функцияҳои термодинамикӣ, кинетикаи оксидшавии баландҳароратӣ ва рафтори зангзанӣ-электрохимиявии хӯлаҳои рӯҳӣ-алюминийгӣ дар қори мазкур мақсад гузошта шудааст, ки ҷойи ҳолӣ оиди хосиятҳои рӯҳ ва хӯлаҳои он пурра гардонида шавад. Кор дар доираи мавзӯи «Стратегияи миллии тарақиёти Тоҷикистон дар давраҳои то соли 2030» оиди инноватсиякунонӣ (пешравӣ дар асоси навигариҳо дар ҳамаи соҳаҳои ҳаёти иҷтимоӣ-иқтисодии кишвар) иҷро карда шудааст.

*Мақсади тадқиқот* коркарди таркибҳои мӯътадили хӯлаҳои рӯҳӣ-алюминий  $Zn5Al$  ва  $Zn55Al$  бо титан ва сирконий ба ҳисоб меравад, ки ҳамчун рӯйпӯши анодӣ барои муҳофизати металлоконструкцияҳо, махсусан конструкцияҳои пӯлодӣ ва иншоотҳо аз зангзанӣ истифода бурда мешаванд.

*Объекти тадқиқот.* Ҳамчун объектҳои тадқиқот рӯҳи тамғаи Ц1 (ГОСТ 3640-94), алюминийи тамғаи А7 (ГОСТ 11069-2001) ва ҷавҳарии алюминий бо

титан (2,5% Ti) ва сирконий (2% Zr), хӯлаҳои рӯҳии таъиноти гуногун ба ҳисоб мераванд.

**Мавзӯи тадқиқот:** ҳамчун мавзӯи тадқиқот хӯлаҳои рӯҳӣ-алюминийи Zn5Al, Zn55Al бо титан ва сирконий ҷавҳаронидашуда ба ҳисоб мераванд.

**Вазифаҳои тадқиқот:**

– тадқиқ намудани хосиятҳои термодинамикӣ ва физикаи гармоӣ хӯлаҳои рӯҳӣ-алюминийи Zn5Al ва Zn55Al бо титан ва сирконий;

– омӯхтани кинетика ва механизми равандҳои оксидшавии хӯлаҳо, дар ҳолати сахт;

– муайян кардани қонуниятҳои тағйирёбии тавсифҳои анодии хӯлаҳои рӯҳӣ-алюминийи Zn5Al ва Zn55Al бо титан ва сирконий ҷавҳаронидашуда, дар муҳити электролити NaCl;

– коркарди таркибҳои мӯътадилӣ хӯлаҳои рӯҳӣ-алюминийи Zn5Al ва Zn55Al бо титан ва сирконий, ва муҳофизати онҳо бо нахустпатенти Ҷумҳурии Тоҷикистон;

– иҷро кардани таҳлили металографии хӯлаҳои рӯҳӣ-алюминийи Zn5Al ва Zn55Al бо титан ва сирконий ҷавҳаронидашуда бо ёрии микроскопи монокулярӣ тамғаи БИОМЕД - 1 (Украина);

– муайян кардани таъсири титан ва сирконий ба сахтӣ ва мустаҳкамӣ хӯлаҳои рӯҳӣ-алюминийи бо титан ва сирконий ҷавҳаронидашудаи Zn5Al ва Zn55Al бо ёрии асбоби сахтисанҷӣ тамғаи ТШ-2.

**Усулҳои тадқиқот:**

– таҳлили микрорентгеноспектралӣ таркибҳои хӯлаҳо дар микроскопи монокулярӣ тамғаи БИОМЕД - 1;

– тадқиқоти физикаи гармоӣ хӯлаҳо дар речаи «хунукшавӣ»;

– омӯзиши термогравиметрии кинетикаи оксидшавии хӯлаҳо;

– тадқиқоти потенциостатикӣ хӯлаҳо бо истифода бурдани потенциостати ПИ-50.1.1, дар речаи потенциодинамикӣ;

– омӯзиши сахтӣ ва ҳудуди устувории хӯлаҳо дар асбоби ТШ-2.

**Соҳаи тадқиқот** металлургия ва масолеҳшиносии хӯлаҳо ба ҳисоб меравад. Кори рисола аз рӯи ду равияи илмӣ иҷро карда шудааст: масолеҳшиносӣ (дар мошинсозӣ) ва металлургияи металҳои сиёҳ, ранга ва нодир.

**Марҳилаҳои тадқиқот.** Тадқиқоти кори рисола дар се марҳила иҷро карда шудааст, дар давраҳои солҳои аз 2016 то 2022. Дар рафти иҷроӣ марҳилаи якум (солҳои 2016-2018) шарҳи маводҳои методикӣ дар адабиётҳои мавҷудбуда оиди масъалаҳои ҳалталаби пешрафти масолеҳшиносӣ ва металлургияи металҳои сиёҳ, ранга ва нодир, таркибҳои фикрронии техникӣ, адабиёти методӣ оиди масъалаи тадқиқот гузаронида шуд.

Ҳангоми иҷроӣ дуум марҳила (солҳои 2018-2020) мафкураҳои ҷамбастии тадқиқот мухтасар ифода карда шуда буданд, масъалаи илмӣ ҳалталаб ошкор карда шуд ва фарзияҳои тадқиқот аниқ ифода карда шуданд, мақомҳои муҳимтарини рисола, ки дар конференсияҳои байналмиллалӣ илмӣ-амалии гуногун муҳокима карда шуда буданд коркард ва маъқул доништа шуд.

Дар марҳилаи сеюм (солҳои 2020-2022) тафтиши таҷрибавии фикрхоро оиди рисола гузаронидем, инчунин ба тартиб даровардани маводҳои тадқиқот иҷро карда шуд.

**Базаи асосии маълумотӣ ва таҷрибавӣ** – таҷрибаҳо дар давоми солҳои 2016 то 2022–юм дар базаи кафедраи «Масолахшиносӣ, мошинҳо ва таҷҳизотҳои металлургӣ»-и ДТТ ба номи акад. М.С. Осимӣ ва дар озмоишгоҳи «Маводҳои ба зангзанӣ устувор»-и Институти химия ба номи В.И. Никитини Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон гузаронида шудаанд. Ба тадқиқотҳои таҷрибавӣ хӯлаҳои рӯҳӣ-алюминийи Zn5Al, Zn55Al бо титан ва сирконий ҷавҳаронидашуда фаро гирифта шуда буданд.

**Мӯтамад будани натиҷаҳои рисола.**

- таъя ба мавқеи бунёдии назария ва методикаи омӯзиши хӯлаҳои рӯҳӣ-алюминийи Zn5Al ва Zn55Al, ки бо титан ва сирконий ҷавҳаронида шудаанд;

- бо таҳлили масъалаи ҳалталаби мавҷудбуда аз нуқтаи назари, чӣ назария, ва чӣ амалияи тадқиқоти хӯлаҳои рӯҳӣ-алюминийи Zn5Al ва Zn55Al, ки бо титан ва сирконий ҷавҳаронида шудаанд;

- бо маҷмӯи усулҳои тадқиқот, таҳлилҳои бисёрқаратаи натиҷаҳои асосии тадқиқоти хӯлаҳои рӯҳӣ-алюминийи Zn5Al ва Zn55Al, ки бо титан ва сирконий ҷавҳаронида шудаанд.

**Навгони илми кор.** Дар асоси таҳлили амиқи маълумотҳои адабиётӣ ва тадқиқотҳои таҷрибавӣ вобастагии ҳароратии функцияҳои физикаи гармо ва термодинамикии хӯлаҳои рӯҳӣ-алюминийи Zn5Al ва Zn55Al, бо титан ва сирконий ҷавҳаронидашуда, муқаррар карда шудаанд. Қонуниятҳои равандҳои оксидшавии баландҳарорати хӯлаҳои сегонаи рӯҳӣ-алюминий бо титан ва сирконий дар муҳити фазогӣ, дар ҳолатҳои сахтӣ нишон дода шудаанд. Қонуниятҳои тағйирёбии тавсифҳои анодии хӯлаҳои рӯҳӣ-алюминийи Zn5Al ва Zn55Al, дар муҳити электролитӣ NaCl аз миқдори титан ва сирконий муқаррар карда шудаанд.

**Арзиши назариявии тадқиқот** дар муқаррар кардани вобастагии функцияҳои термодинамикӣ, гармигунҷой, тавсифҳои энергетикӣ ва кинетикии хӯлаҳои рӯҳӣ-алюминийи Zn5Al ва Zn55Al, бо титан ва сирконий ҷавҳаронидашуда иборат мебошад.

**Арзиши амалии тадқиқот** дар коркарди таркибҳои мӯътадилӣ хӯлаҳои рӯҳӣ-алюминийи Zn5Al ва Zn55Al, бо титан ва сирконий ҷавҳаронидашуда иборат мебошад.

**Мавқеъҳо, ки ба ҳимоя пешкаш мегарданд:**

– натиҷаҳои тадқиқотҳои хосиятҳои физикаи гармо, вобастагии ҳароратии функцияҳои термодинамикии хӯлаҳои рӯҳӣ-алюминийи Zn5Al ва Zn55Al, бо титан ва сирконий ҷавҳаронидашуда;

– қонуниятҳои тағйирёбии параметрҳои энергетикӣ ва кинетикии раванди оксидшавии хӯлаҳои рӯҳӣ-алюминийи Zn5Al ва Zn55Al, бо титан ва сирконий ҷавҳаронидашуда;

– муайян кардани механизми оксидшавии хӯлаҳои рӯҳӣ-алюминий дар ҳолати сахтӣ;

– асоснок кардани тағйирёбии тавсияҳои анодии хӯлаҳои рӯҳӣ-алюминийи Zn5Al ва Zn55Al, бо титан ва сирконий чавҳаронидашуда вобаста аз муҳити NaCl ва миқдори иловаи чавҳарӣ.

**Саҳми шахсии унвонҷӯ** дар таҳлили маълумотҳои манбаъҳои адабиётӣ, гузаронидани таҷрибаҳо дар озмоишгоҳҳо, ҳалли масъалаҳои тадқиқот ва дар таҳлили натиҷаҳои бадастомада, инчунин тартиб додани мавқеъҳои асосӣ ва хулосаҳои рисола иборат мебошад.

**Тасдиқи маълумотҳои рисола ва натиҷаҳои истифодашудаи он.** Натиҷаҳои кори рисола дар конференсияҳои илмӣ зерин муҳокима ва маълумот дода шудаанд: Конференсияи ҷумҳуриявии илмӣ-амалии «Масъалаҳои масолахшиносӣ дар мошинсозии Ҷумҳурии Тоҷикистон», бахшида ба «Рӯзи кимёгарон» ва 80-солагии рӯзи таваллуди доктори илмҳои техникӣ, профессор, академики Академияи байналмиллалӣ муҳандисӣ Ваҳобов Анвар Ваҳобович. (Душанбе, 2016); Хонишҳои XIII Нӯъмонӣ «Дастовардҳои илми кимиё дар 25 соли истиқлолияти Ҷумҳурии Тоҷикистон», бахшида ба 70-солагии ташкилёбии Институти кимиёи Академияи илмҳои Ҷумҳурии Тоҷикистон (Душанбе, 2016); Конференсияи XX байналмилалӣ илмӣ-амалии «Тамоялҳои муосири тарақиёти илм ва технологияҳо» (Белгород, 2016); Конференсияи Ҷумҳуриявии илмӣ амалии «Тарақиёти ояндадори илмҳои табиӣ» бахшида ба амаликунии «Барномаи тарақиёти илмҳои табиӣ, риёзӣ ва техникӣ дар солҳои 2010-2020». Донишгоҳи Русӣ – Тоҷикӣ (Славянӣ) (Душанбе, 2018). Конфронси байналмилалӣ илмӣ-амалӣ дар мавзӯи «Дурнамои истифодаи маводҳои ба коррозия устувор дар саноати Ҷумҳурии Тоҷикистон» (Душанбе, 2018). Конференсияи байналмилалӣ илмӣ-амалии донишҷӯён, магистрон, унвонҷӯён ва олимони ҷавон “Муҳандис-2019” (Душанбе, 2019). Конференсияи IV–и илмӣ байналмилалӣ: «Масъалаҳои кимиёи физикӣ ва координатсионӣ», бахшида ба гиромидошти хотираи докторони илмҳои кимиё, профессорон Ҳомид Муҳсинович Яқубов ва Зухуриддин Нуриддинович Юсуфов (Душанбе, 2019). Конференсияи Ҷумҳуриявии илмӣ-амалии «Саноатикунонӣ – омили тарақиёти иқтисодиёти Ҷумҳуриӣ» (Хӯҷанд, 2020). Конференсияи X-ми илмӣ-амалии «Хонишҳои Ломоносовӣ» (Душанбе, 2020). Конференсияи байналмилалӣ илмӣ-амалӣ дар мавзӯи «Проблемаҳои муосири саноати металлургӣ», бахшида ба эълон гардидани ҳадафи чоруми миллӣ – саноатикунонии босуръати кишвар ва 25-солагии таъсисёбии кафедраи «Металлургия» (Душанбе, 2021).

**Наири натиҷаҳои рисола.** Аз рӯи натиҷаҳои тадқиқот 17 кори илмӣ нашр гардидааст, ки 5-тои онҳо дар маҷалаҳои тавсияшавандаи КОА-и назди Президенти Ҷумҳурии Тоҷикистон нашр гардида оиди мавзӯи рисола 1 нахустпатенти Ҷумҳурии Тоҷикистон ба даст оварда шудааст.

**Соҳт ва ҳаҷми рисола.** Рисола аз муқаддима, 4 боб, хулосаҳо, рӯйхати адабиётҳо ва замима иборат мебошад, Кор дар 166 саҳифаи чопи компютерӣ баён ёфта, 57 ҷадвал ва 60 расмро дарбар гирифтааст. Рӯйхати адабиётҳо 138 номгӯйро ташкил медиҳад.

## МУНДАРИЧАИ АСОСИИ РИСОЛА

**Дар муқаддима** масъалаҳои муҳими тадқиқот, инчунин шартҳои пешакии он ифода ёфта мубрам будани рисола асоснок карда шудааст, аҳамияти амалӣ ва навгонии илмии рисола инъикос гардидааст, мавқеъҳои муҳиме, ки ба ҳимоя пешкаш мешаванд номбар карда шудааст.

**Дар боби якум** хосиятҳои асосӣ ва соҳаҳои истифодашавии рӯҳ ва хӯлаҳои он тавсиф гардидаанд; хосиятҳои физикаи гармоӣ рӯҳ, алюминий, титан, сирконий ва хӯлаҳои рӯҳӣ-алюминӣ; хусусиятҳои оксидшавии рӯҳ ва хӯлаҳои рӯҳӣ-алюминӣ; зангзании рӯҳ ва хӯлаҳои рӯҳӣ-алюминӣ. Шарҳи адабиётҳо оиди масъалаи мазкур нишон медиҳад, ки ҳамин гуна тадқиқотҳои физикӣ-химиявӣ бо иштироки хӯлаҳои Zn5Al ва Zn55Al бо металҳои ишқорзаминӣ ва нодирзаминӣ ҷавҳаронидашуда гузаронида шудаанд. Аммо, таҳлили адабиётҳо ва ҷустуҷӯ дар шабакаи интернет мавҷуд набудани маълумотҳои таҷрибавиро оиди тадқиқотҳои физикӣ-химиявӣ хӯлаҳои Zn5Al ва Zn55Al бо металҳои гузаранда (титан, сирконий) –ро тасдиқ менамоянд.

Истифодашавии васеи хӯлаҳо дар асосӣ рӯҳ дар соҳаҳои гуногуни саноат гузаронидани тадқиқотҳои мурағтаби физикӣ-химиявӣ хӯлаҳои Zn5Al ва Zn55Al бо титан ва сирконий ҷавҳаронидашударо талаб менамояд. Шарҳи адабиятҳо гувоҳӣ медиҳанд, ки хосиятҳои ҳароратӣ, термодинамикӣ, кинетикӣ ва анодии хӯлаҳои Zn5Al ва Zn55Al бо металҳои гузарандаи зикрғашта амалан омӯхта нашудаанд.

Аз гуфтаҳои боло бармеояд, ки тадқиқоти гармиғунҷоиши нисбӣ ва тағйирёбии функсияҳои термодинамикӣ, кинетикаи оксидшавӣ ва рафтори анодии хӯлаҳои рӯҳӣ-алюминийи Zn5Al ва Zn55Al бо титан ва сирконий ҷавҳаронидашуда, ки ба сифати рӯйпӯшҳои анодии маснуотҳои металӣ ва конструкторияҳо истифода бурда мешаванд, вазифаи мубрам ба ҳисоб меравад ва тавсифи амалию бунёдӣ дорад.

**Дар боби дуюм** натиҷаҳои таҷрибавӣ тадқиқоти вобастагии ҳароратии гармиғунҷоиш ва тағйирёбии функсияҳои термодинамикии хӯлаҳои рӯҳӣ-алюминийи Zn5Al, Zn55Al бо титан ва сирконий оварда шудаанд.

**Боби сеюм** тадқиқотҳои кинетикаи оксидшавии хӯлаҳои рӯҳӣ-алюминийи Zn5Al ва Zn55Al-ро бо титан ва сирконий, дар ҳолати сахтӣ, дар муҳити электролити NaCl дарбар гирифтааст.

**Боби чорум** рисола натиҷаҳои тадқиқоти таҷрибавӣ рафтори зангзанӣ-электрохимиявӣ хӯлаҳои рӯҳӣ-алюминийи Zn5Al, Zn55Al-ро бо титан ва сирконий фаро гирифтааст. Рисола бо хулосаҳои умумӣ, рӯйхати адабиётҳо, адабиётҳои иқтибосовардашуда ва замима ба анҷом мерасад.

### **Боби II. ВОБАСТАГИИ ҲАРОРАТИИ ГАРМИҒУНҶОИШ ВА ТАҒЙИРЁБИИ ФУНКСИЯҲОИ ТЕРМОДИНАМИКИИ ХҶЛАҲОИ РҶҲӢ-АЛЮМИНИИ Zn5Al, Zn55Al БО ТИТАН ВА СИРКОНИИ**

Дар боби мазкури рисола аз рӯи гармиғунҷоиши нисбии намунаи меъерии мисӣ бо истифодаи суръати хунуқшавии намунаҳо гармиғунҷоиши нисбӣ ва функсияҳои термодинамикии хӯлаҳои рӯҳӣ-алюминийи Zn5Al ва Zn55Al бо титан ва сирконий ҷавҳаронидашуда тадқиқ карда шудаанд.

Ҳисоби гармиғунҷоиш чунин асоснок карда мешавад. Қисми пештар тафсонидашуда баъди хунукшавӣ вазни  $m$  –ро ба  $dT$  градус гум мекунад, миқдори гармӣ  $\delta Q$  аз рӯи ифодаи зерин ҳисоб карда шуд

$$\delta Q = C_p^0 m dT, \quad (1)$$

дар ин ҷо  $C_p^0$  – гармиғунҷоиши нисбии модда аст, ки қисм аз он иборат мебошад.

Дар назар дошт, ки энергия аз сатҳи қисм гум мешавад, шуморида мешавад, ки миқдори гармии гумшудаи  $\delta Q_S$  аз сатҳи қисм дар фосилаи вақти  $dt$ , мутаносибан ба фарқи ҳароратҳо миёни муҳити атроф  $T_0$  ва қисми  $T$  майдони сатҳи  $S$  ва вақт баробар мешавад

$$\delta Q_S = \alpha(T - T_0) \cdot S dt. \quad (2)$$

Коэффитсиенти гармидиҳӣ  $\alpha$  ҳангоми фарқи ҳароратҳо ба 1К бо Вт/(м<sup>2</sup>•К) на ҳама вақт доимист ва аз фарқи ҳароратҳо вобастагӣ дорад, ки дар натиҷаи он қонун тақрибӣ ҳисобида мешавад. Селаи ҳароратиро ҳамчун вектор дида баромада, бояд ба инобат гирифта шавад, ки вай ба сатҳ амудӣ раван аст, ки аз болои он ҳангоми як воҳиди баландии ҳароратӣ  $\alpha$ -миқдори ҳароратдар воҳиди вақт ба 1 м<sup>2</sup> –и сатҳ мегузарад. Якчанд омилҳо: геометрияи тана, ҳолати сатҳ ва самти села; навъи конвексия ва речаи села; навъи гармибаранда ва ҳарорати он ба селаи гармӣ таъсир мерасонанд. Пас, функсияи раванди таҳвили гармӣ  $\alpha$  қимати қадвалӣ ба ҳисоб намеравад,  $\alpha$  минбаъд ҳамчун бузургии ҳисобӣ бо роҳи таҷрибавӣ ҳисоб карда мешавад.

Агар қисм чунин гармӣ паҳн кунад, ки ҳарорати ҳамаи нуқтаҳои он якхела тағйир ёбад, он гоҳ баробарии зеринро одилона ҳисобидан мумкин аст

$$\delta Q = \delta Q_S \text{ ва } C_p^0 m dT = \alpha(T - T_0) S dt. \quad (3)$$

Ифодаи (3)-ро дар намуди зерин пешниҳод кардан мумкин аст

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

Фарз мекунем, ки  $C_p^0$ ,  $\alpha$ ,  $T$  ва  $T_0$  дар фосилаҳои хурди ҳарорат аз координатаҳои нуқтаҳои сатҳи намуна вобаста нестанд, ки то ҳарорати баробари муҳити атроф тафсонида шудаанд, онгоҳ таносуби (4) барои ду намуна шакли зеринро мегирад:

$$C_{p_1}^0 m_1 s_1 \alpha_1 \left(\frac{dT}{dt}\right)_1 = C_{p_2}^0 m_2 s_2 \alpha_2 \left(\frac{dT}{dt}\right)_2, \quad (5)$$

Ин баробариро барои ду намуна истифода мебарем, ки яке аз онҳо меъёри стандарти мебошад, бо андозаҳои якхела ва ҳолати сатҳҳо ( $S_1 = S_2$ ), тахмин кардан мумкин аст, ки коэффитсиентҳои гармидиҳӣ баробар  $\alpha_1 = \alpha_2$  мешаванд ва бо муодилаи зерин ифода меёбанд

$$C_{p_1}^0 m_1 \left(\frac{dT}{dt}\right)_1 = C_{p_2}^0 m_2 \left(\frac{dT}{dt}\right)_2, \quad (6)$$

Аз ин муодила, гармиғунҷоиши нисбии  $C_{p_1}^0$  суръати хунукшавии намунаи меъёрӣ  $\left(\frac{dT}{dt}\right)_1$ , намунаи санҷидашаванда  $\left(\frac{dT}{dt}\right)_2$  ва вазни намунаҳо  $m_1$  ва  $m_2$  –ро доништа, гармиғунҷоиши моддаи номаълумро  $C_{p_2}^0$  ҳисоб кардан мумкин аст



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

Бо ёрии усули мазкур натиҷаҳои барои мис ва алюминий ба даст овардашуда, бо маълумотҳои, ки дар манбаъҳои адабиёти мавҷуданд мувофиқат менамоянд.

Тадқиқоти вобастагии гармиғунҷоиш ва тағйирёбии функсияҳои термодинамикии ҳӯлаҳои рӯҳӣ-алюминийи Zn5Al ва Zn55Al бо титан ва сирконий бо усули дар боло зикрфта гузаронида шудаанд. Вобастагии ҳароратии намунаҳо аз вақти хунукшавӣ барои ҳӯлаҳои рӯҳӣ-алюминийи Zn5Al ва Zn55Al бо титан ва сирконий дар расми 1 пешниҳод гардидаанд, ки дар рафти таҷриба ба даст оварда шудаанд ва бо муодилаи намуди зерин тавсиф мегарданд

$$T = T_0 + \frac{1}{2} \left[ (T_1 - T_0) e^{-t/\tau_1} + (T_2 - T_0) e^{-t/\tau_2} \right]. \quad (8)$$

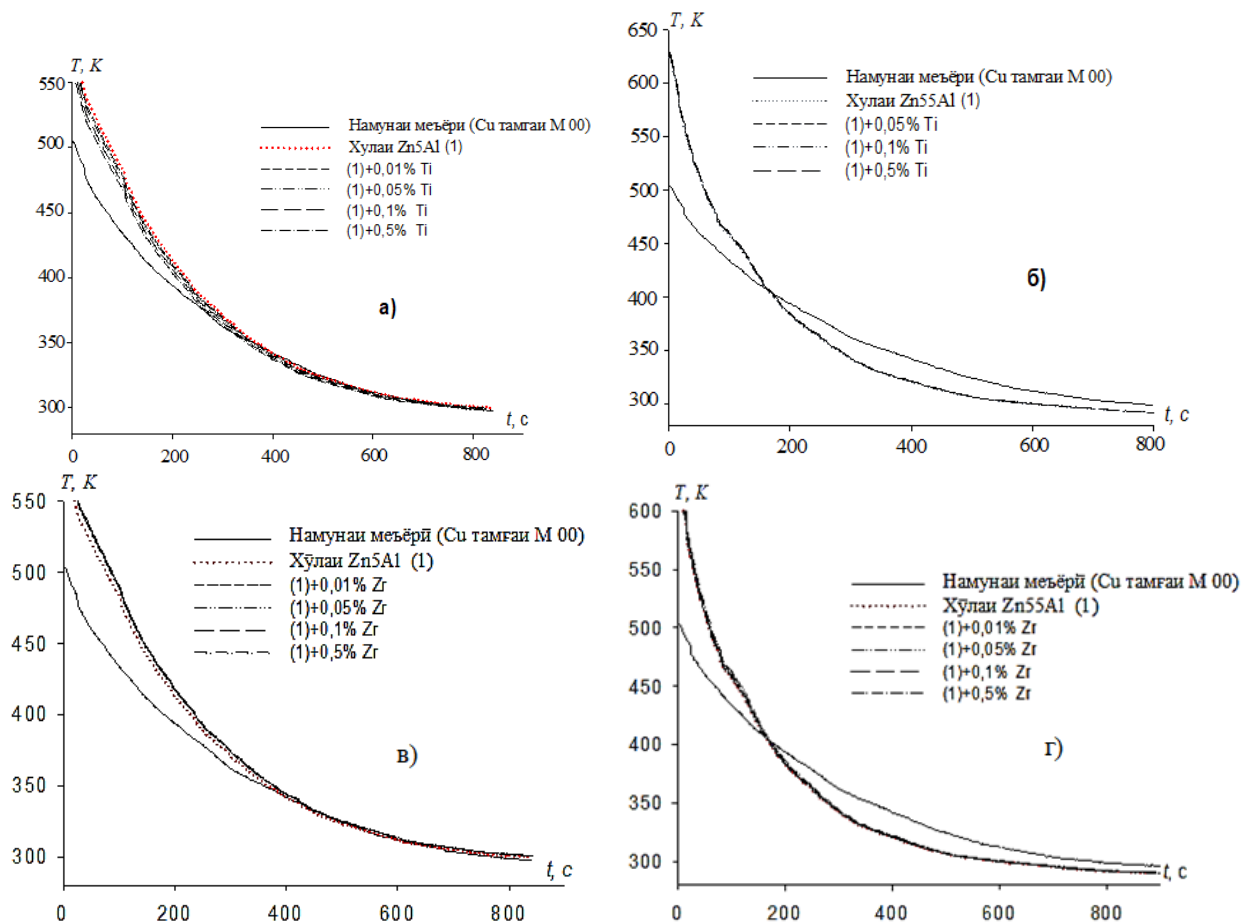
Ҳангоми дифференсиал ёфтани муодилаи (8) аз рӯи  $t$  барои суръати хунукшавии намунаҳои ҳӯлаҳои Zn5Al ва Zn55Al бо титан ва сирконий ҷавҳаронидашуда ҳосил мекунем

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{2} \left[ -\left(\frac{T_1 - T_0}{\tau_1}\right) e^{-t/\tau_1} - \left(\frac{T_2 - T_0}{\tau_2}\right) e^{-t/\tau_2} \right]. \quad (9)$$

Дар раванди иҷрои кор таъсири титан ва сирконий ба хосиятҳои физикаи гармо ва функсияҳои термодинамикии ҳӯлаҳои рӯҳӣ-алюминийи Zn5Al ва Zn55Al тадқиқ карда шудаанд. Барои ба даст овардани ҳӯлаҳо рӯҳи тамғаи Ц1 (ГОСТ 3640-94), алюминийи тамғаи А7 (ГОСТ 11069 - 2001) ва ҷавҳаркунандаҳои он бо титан ва сирконий истифода бурда шудааст. Ҷавҳаркунандаҳои алюминий бо титан (2,5% Ti) ва сирконий (2% Zr) пешакӣ дар зери фишори гази инертӣ дар оташдони вакуумӣ синтез карда шуда буд. Микдори титан ва сирконий дар таркиби ҳӯлаҳои рӯҳӣ-алюминийи Zn5Al ва Zn55Al бо %-и вазн ташкил дод: 0,05; 0,01; 0,1; 0,5. Гудозаҳоро дар тарозӯи таҳлили АРВ-200 бо саҳеҳии  $0,1 \cdot 10^{-6}$  кг бар кашидем. Гудозатайёркунӣ бо назардошти ғуборҳои металлӣ гузаронида шуд. Оташдони барқии муқовиматии СШОЛ то  $850^\circ\text{C}$  тафсонида шуда алюминий ва рӯҳ гудохта шуд, сипас ба таркиби он ҷавҳарии титан илова карда шуда буд. Қиёсан ҳамин гуна ҳӯлаҳо бо сирконий ҳосил кардем. Баъди чанде нигоҳ доштан ва дар зери ҳарорати зарурӣ дар муддати 30 дақиқа аз дашғол тоза карда гудохтаро бодикқат омехта кардем. Аз гудохтаи ҳосилкардашуда дар қолиби графитӣ намунаҳо бо қутрҳои 16 мм ва дарозии 30 мм барои омӯзиши вобастагии ҳароратии гармиғунҷоиш ва тағйирёбии функсияҳои термодинамикии ҳӯлаҳои рӯҳӣ-алюминийи Zn5Al ва Zn55Al бо титан ва сирконий ҷавҳаронидашуда ба даст оварда шуд.

Таркиби ҳӯлаҳои ҳосилкардашуда интихобан бо ёрии таҳлили химиявӣ санҷида шуданд, вазни намунаҳо бошад то ва баъди ҷавҳаронидан бар кашида шуд. Сипас ҳӯлаҳо барои фарқияти вазн тадқиқ карда шуданд, ки вазн на зиёда аз 2% (нисбатан) –ро то ва баъди гудоختан ташкил меод.

Аз рӯи муодилаи (9) аз тарафи мо суръати хунукшавии намунаҳо аз ҳӯлаҳои рӯҳӣ-алюминийи Zn5Al, Zn55Al ва намунаи меъёрӣ ҳисоб карда шуданд, ки ба намуди графикҳо дар расми 1 нишон дода шудаанд.



**Расми 1-** Каҷхатаҳои вобастагҳои ҳарорати намунаҳо аз хӯлаҳои руҳӣ-алюминийи Zn5Al, Zn55Al бо титан (а, б) ва сирконий (в, г) аз вақти хунукшавӣ.

Дар ҷадвали 1 ва 2 барои хӯлаҳои тадқиқотшаванда қиматҳои коэффисиентҳои  $\Delta T_{01}$ ,  $t_1$ ,  $\Delta T_{02}$ ,  $t_2$  дар муодилаи (9) оварда шудаанд.

**Ҷадвали 1** – Қиматҳои коэффисиентҳои  $\Delta T_1$ ,  $t_1$ ,  $\Delta T_2$ ,  $t_2$  –и муодилаи (9) барои хӯлаҳои руҳӣ-алюминийи Zn5Al ва Zn55Al бо титан ва намунаи меъёрӣ (Cu тамғаи M00)

Микдори титан дар хӯлаҳо, %-и вазн	$T_1 - T_0$ , К	$t_1$ , с	$T_2 - T_0$ , К	$t_2$ , с	$(T_1 - T_0)/\tau_1$ , К/с	$(T_2 - T_0)/\tau_2$ , К/с	$T_0$ , К
Хӯлаи Zn5Al	143,12	234,33	143,39	234,33	0,6107	0,6119	290,56
0,01	140,549	236,35	140,67	236,35	0,5947	0,5952	289,36
0,05	139,11	236,35	139,23	236,35	0,5886	0,5891	289,20
0,1	136,25	236,35	136,36	236,35	0,5765	0,5770	288,87
0,5	133,38	236,35	133,49	236,35	0,5643	0,5648	288,54
Хӯлаи Zn55Al	57,04	20,70	290,44	180,01	2,7552	1,6135	288,43
0,05	57,613	20,70	293,35	180,01	2,7827	1,6297	288,59
0,1	57,56	20,70	293,06	180,01	2,7800	1,6280	288,57
0,5	58,07	20,70	295,67	180,01	2,8048	1,6426	288,71
Намунаи меъёрӣ	18,42	19,19	208,99	316,11	0,9595	0,6612	281,98

**Ҷадвали 2** – Қиматҳои коэффитсиентҳои  $\Delta T_1$ ,  $t_1$ ,  $\Delta T_2$ ,  $t_2$  –и муодилаи (9) барои хӯлаҳои руҳӣ-алюминийи Zn5Al ва Zn55Al бо сирконий ва намунаи меъёрӣ (Cu тамғаи М 00)

Микдори сирконий дар хӯлаҳо, %-и вазн	$T_1 - T_0$ , К	$t_1$ , с	$T_2 - T_0$ , К	$t_2$ , с	$(T_1 - T_0)/\tau_1$ , К/с	$(T_2 - T_0)/\tau_2$ , К/с	$T_0$ , К
Хӯлаи Zn5Al	143,12	234,33	143,39	234,33	0,6107	0,6119	290,56
0,01	147,40	235,16	147,88	235,16	0,6269	0,6289	290,72
0,05	148,76	235,97	148,13	235,97	0,6305	0,6277	290,37
0,1	148,20	235,31	148,99	235,31	0,6298	0,6332	290,77
0,5	148,97	235,99	149,24	235,99	0,6312	0,6324	290,51
хӯлаи Zn55Al	57,04	20,70	290,44	180,01	2,7552	1,6135	288,43
0,01	57,32	20,70	291,89	180,01	2,7689	1,6216	288,51
0,05	57,50	20,70	292,77	180,01	2,7772	1,6264	288,56
0,1	58,18	20,70	296,25	180,01	2,8103	1,6458	288,74
0,5	58,87	20,70	299,74	180,01	2,8433	1,6652	288,92
Намунаи меъёрӣ	18,42	19,19	208,99	316,11	0,9595	0,6612	281,98

Муодилаи (7) ва барномаи *Sigma Plot* -ро истифода намуда, барои вобастагии ҳароратии гармиғунҷоиши нисбии хӯлаҳои Zn5Al ва Zn55Al, ки бо титан ва сирконий ҷавҳаронида шудаанд дар фосилаи ҳароратҳои 300-600 К муодилаи зеринро ҳосил намудем

$$C^0_p = a + bT^2 + cT^3 + dT^4. \quad (10)$$

Қиматҳои коэффитсиентҳое, ки дар муодилаи (10) мавҷуданд, дар ҷадвалҳои 3 ва 4 пешниҳод гардидаанд.

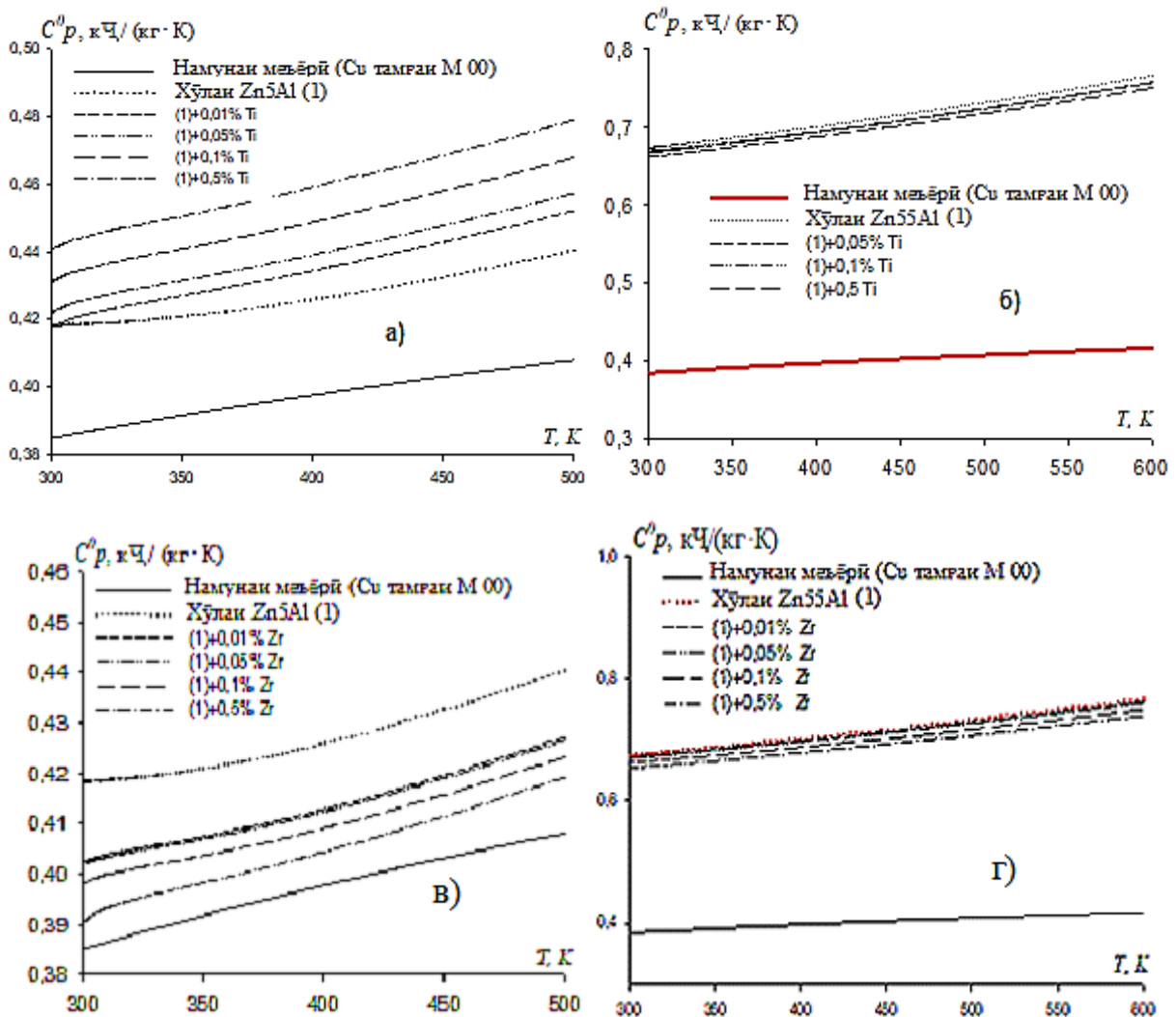
**Ҷадвали 3**– Қиматҳои коэффитсиентҳои  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  –и муодилаи (10) барои хӯлаҳои руҳӣ-алюминийи Zn5Al ва Zn55Al бо титан ва намунаи меъёрӣ (Cu тамғаи М 00)

Микдори титан дар хӯлаҳо, %-и вазн	$a$ , Ҷ/(кг·К)	$b \cdot 10^{-4}$ , Ҷ/(кг·К <sup>2</sup> )	$c \cdot 10^{-7}$ , Ҷ/(кг·К <sup>3</sup> )	$d \cdot 10^{-10}$ , Ҷ/(кг·К <sup>4</sup> )	Коэффитсиенти коррелятсия R <sup>2</sup>
Хӯлаи Zn5Al	0,4916	-5,90	14,2	-8,90	0,999
0,01	0,3255	5,18	-9,31	8,01	0,999
0,05	0,3274	5,34	-9,67	8,34	0,999
0,1	0,3311	5,68	-1,05	9,07	0,999
0,5	0,3348	6,06	-11,3	9,87	0,999
Хӯлаи Zn55Al	0,6160	1,28	2,35	$-0,522 \cdot 10^{-11}$	0,999
0,01	0,6102	1,27	2,28	$-0,502 \cdot 10^{-11}$	0,999
0,05	0,6509	-1,27	7,56	-4,10	0,999
0,1	0,6057	1,26	2,22	$-0,486 \cdot 10^{-11}$	0,999
0,5	0,6057	1,26	2,22	$-0,486 \cdot 10^{-11}$	0,999
Намунаи меъёрӣ	0,325	2,75	-2,87	1,42	1,00

Ҳисоби қиматҳои  $C_p^0$  барои намунаҳо аз хӯлаҳои руҳӣ-алюминийи Zn5Al ва Zn55Al бо титан ва сирконий баъд аз 50 К дар расми 2 оварда шудааст.

**Ҷадвали 4** – Қиматҳои коэффициентҳои  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ –и муодилаи (10) барои ҳулаҳои руҳӣ-алюминийи Zn5Al ва Zn55Al бо сирконий ва намунаи меъёрӣ (Cu тамғаи М00)

Миқдори сирконий дар ҳулаҳо, %-и вазн	$a$ , $\text{Ч}/(\text{кг}\cdot\text{К})$	$b\cdot 10^{-4}$ , $\text{Ч}/(\text{кг}\cdot\text{К}^2)$	$c\cdot 10^{-7}$ , $\text{Ч}/(\text{кг}\cdot\text{К}^3)$	$d\cdot 10^{-10}$ , $\text{Ч}/(\text{кг}\cdot\text{К}^4)$	Коэффициенти коррелятсия $R^2$
Ҳулаи Zn5Al	0,4916	-5,90	14,2	-8,90	0.999
0,01	0,4091	-1,35	4,43	-2,01	0.999
0,05	0,4068	-1,24	4,20	-1,87	0.999
0,1	0,3956	-6,52	2,94	$-9,82\cdot 10^{-11}$	0.999
0,5	0,3395	2,78	-4,22	4,04	0.999
Ҳулаи Zn55Al	0,6160	1,28	2,35	$-0,522\cdot 10^{-11}$	0.999
0,01	0,6131	1,27	2,31	$-0,512\cdot 10^{-11}$	0.999
0,05	0,6114	1,27	2,29	$-0,506\cdot 10^{-11}$	0.999
0,1	0,6436	-1,21	7,29	-3,94	0.999
0,5	0,6047	8,01	2,98	$-0,996\cdot 10^{-11}$	0.999
Намунаи меъёрӣ	0,325	2,75	-2,87	1,42	1.00



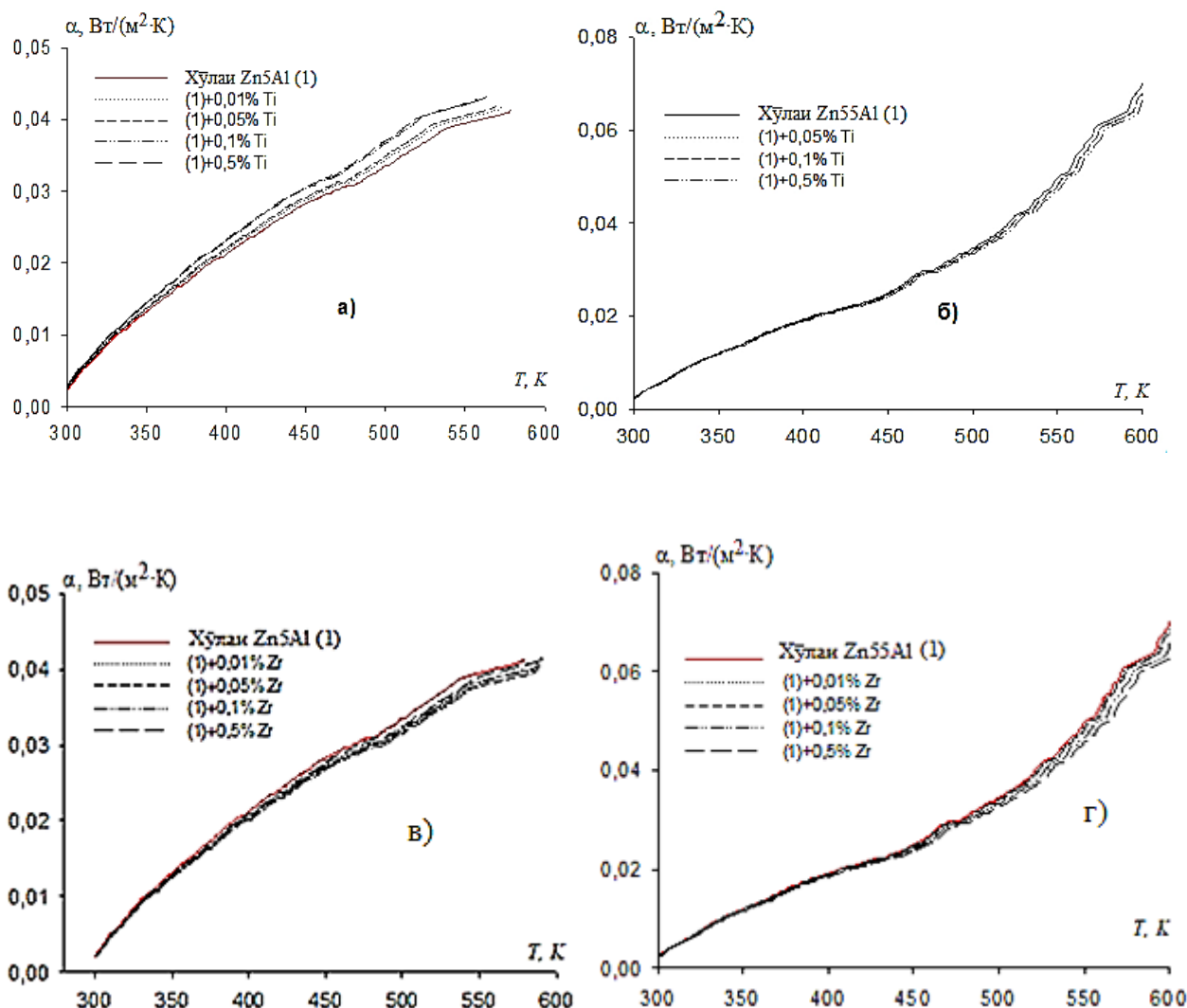
**Расми 2.11** – Вобастагии гармиғунҷоиши нисбӣ аз ҳароратҳо барои ҳулаҳои руҳӣ-алюминийи Zn5Al ва Zn55Al бо титан (а, б) ва сирконий (в, г).

Қиматҳои гармиғунҷоиши ҳулаҳои Zn5Al, Zn55Al бо титан ва сирконий, намунаи меъёрӣ ва бузургиҳои ба даст овардашудаи таҷрибавии суръати хунукшавиро мо истифода бурда коэффитсиенти гармидиҳӣ  $\alpha$ , (Вт/(К·м<sup>2</sup>))-ро барои ҳулаҳои руҳӣ-алюминийи Zn5Al ва Zn55Al бо титан ва сирконий ва намунаи меъёрӣ бо ифодаи дар зер овардашуда ҳисоб кардем

$$\alpha = \frac{Cm \frac{dT}{dt}}{(T-T_0) \cdot S}, \quad (11)$$

дар ин ҷо:  $T$  – ҳарорати намуна,  $T_0$  – ҳарорати муҳити атроф,  $S$  – масоҳати сатҳ,  $m$  – вазни намуна.

Вобастагии ҳароратии коэффитсиенти гармидиҳӣ бо муодилаи (11) барои ҳулаҳои руҳӣ-алюминийи Zn5Al ва Zn55Al бо титан ва сирконий ҳисоб карда шудааст, ки дар расми 3 оварда шудааст.



Расми 3 - Вобастагии ҳароратии коэффитсиенти гармидиҳии ҳулаҳои руҳӣ-алюминийи Zn5Al, Zn55Al бо титан (а, б) ва сирконий (в, г).

Тағйирёбии вобастагии ҳароратии энталпия, энтропия ва энергияи Гиббс барои хӯлаҳои руҳӣ-алюминийи Zn5Al ва Zn55Al бо титан ва сирконий аз рӯи муодилаҳои (12) - (14) дар натиҷаи истифодаи полиномҳои (10) ҳисоб карда шудаанд:

$$[H^{\circ}(T) - H^{\circ}(T_0)] = a(T - T_0) + \frac{b}{2}(T^2 - T_0^2) + \frac{c}{3}(T^3 - T_0^3) + \frac{d}{4}(T^4 - T_0^4); \quad (12)$$

$$[S^{\circ}(T) - S^{\circ}(T_0)] = a \ln \frac{T}{T_0} + b(T - T_0) + \frac{c}{2}(T^2 - T_0^2) + \frac{d}{3}(T^3 - T_0^3); \quad (13)$$

$$[G^{\circ}(T) - G^{\circ}(T_0)] = [H^{\circ}(T) - H^{\circ}(T_0)] - T[S^{\circ}(T) - S^{\circ}(T_0)], \quad (14)$$

дар ин ҷо,  $T_0 = 273,15$  К.

Натиҷаҳои ҳисоби тағйирёбии энталпия, энтропия ва энергияи Гиббс барои хӯлаҳои руҳӣ-алюминийи Zn5Al ва Zn55Al бо титан ва сирконий баъд аз 50 К дар ҷадвалҳои 5 ва 6 пешниҳод карда шудаанд.

**Ҷадвали 5** – Вобастагии ҳароратии тағйирёбии функсияҳои термодинамикии хӯлаи руҳӣ-алюминийи Zn5Al бо титан ва намунаи меъёрӣ (Cu тамғаи M00)

T, K	Намунаи меъёрӣ	Хӯлаи Zn5Al (1)	(1)+ 0,01% Ti	(1)+ 0,05% Ti	(1)+ 0,1% Ti	(1)+ 0,5% Ti
	[ $H^{\circ}(T) - H^{\circ}(T_0^*)$ ], кҶ/кг барои хӯлаҳо					
300	0,711986	0,773949	0,774362	0,782406	0,79775	0,81653
350	20,13154	21,74397	21,9233	22,15282	22,5875	23,1285
400	39,8675	42,90353	43,4764	43,93482	44,7958	45,8879
450	59,88805	64,35731	65,42621	66,12123	67,4155	69,0899
500	80,16671	86,17662	87,7953	88,73614	90,47296	92,7664
[ $S^{\circ}(T) - S^{\circ}(T_0^*)$ ], кҶ/(кг · К) барои хӯлаҳо						
300	0,002381	0,002588	0,002589	0,002616	0,002667	0,00273
350	0,062238	0,067234	0,067775	0,068485	0,069828	0,07150
400	0,114937	0,123736	0,125324	0,126644	0,129127	0,13226
450	0,162092	0,174266	0,177021	0,178898	0,182401	0,18691
500	0,204819	0,220236	0,224149	0,226544	0,230979	0,23679
[ $G^{\circ}(T) - G^{\circ}(T_0^*)$ ], кҶ/кг барои хӯлаҳо						
300	-0,0022	-0,0024	-0,0024	-0,00242	-0,00247	-0,00253
350	-1,65181	-1,78782	-1,79799	-1,81677	-1,85242	-1,89651
400	-6,10716	-6,59073	-6,65308	-6,72286	-6,85473	-7,01967
450	-13,0534	-14,0623	-14,2331	-14,383	-14,6649	-15,0216
500	-22,2427	-23,9416	-24,2792	-24,5361	-25,0167	-25,6319

**Ҷадвали 6** – Вобастагии ҳароратии тағйирёбии функсияҳои термодинамикии хӯлаи руҳӣ-алюминийи Zn55Al бо титан ва намунаи меъёрӣ (Cu тамғаи M00)

T, K	Намунаи меъёрӣ	Хӯлаи Zn55Al (2)	(2)+ 0,01% Ti	(2)+ 0,05% Ti	(2)+ 0,1% Ti	(2)+ 0,5% Ti
	[H <sup>0</sup> (T) – H <sup>0</sup> (T <sub>0</sub> <sup>*</sup> )], кҶ/кг барои хӯлаҳо					
300	0,711986	1,246724	1,234382	1,301947	1,1402	0,711986
350	20,13154	35,28014	34,92796	36,93318	31,96559	20,13154
400	39,8675	69,99668	69,29176	73,4777	62,76295	39,8675
450	59,88805	105,4404	104,3687	111,0092	93,45109	59,88805
500	80,16671	141,6535	140,1997	149,5859	123,9306	80,16671
550	100,6823	178,676	176,8239	189,2509	154,0838	100,6823
600	121,419	216,5461	214,2786	230,0317	183,7749	121,419
[S <sup>0</sup> (T) – S <sup>0</sup> (T <sub>0</sub> <sup>*</sup> )]. кҶ/(кг · K) барои хӯлаҳо						
300	0,002381	0,004169	0,113164	0,004385	0,004095	0,002381
350	0,062238	0,109068	0,209917	0,11509	0,107114	0,062238
400	0,114937	0,201762	0,297529	0,213585	0,198114	0,114937
450	0,162092	0,285238	0,378018	0,302929	0,280033	0,162092
500	0,204819	0,361532	0,452819	0,385177	0,354874	0,204819
550	0,243922	0,432092	0,522988	0,461765	0,424061	0,243922
600	0,280006	0,497984	0,533728	0,533728	0,488642	0,280006
[G <sup>0</sup> (T) – G <sup>0</sup> (T <sub>0</sub> <sup>*</sup> )]. кҶ/кг барои хӯлаҳо						
300	-0,0022	-0,00386	-0,05932	-0,0136	-0,08818	-0,0022
350	-1,65181	-2,89365	-4,6796	-3,3482	-5,52431	-1,65181
400	-6,10716	-10,7081	-14,675	-11,9564	-16,4827	-6,10716
450	-13,0534	-22,9167	-29,5194	-25,309	-32,564	-13,0534
500	-22,2427	-39,1125	-48,8095	-43,0026	-53,5064	-22,2427
550	-33,475	-58,9746	-72,2267	-64,7199	-79,1495	-33,475
600	-46,5847	-82,2441	-99,5143	-90,2049	-109,41	-46,5847

Тадқиқотҳои гузаронидашуда нишон медиҳанд, ки бо зиёд шудани ҳарорат гармиғунҷоиши нисбӣ, энтропия ва энталпияи хӯлаҳои руҳӣ-алюминийи Zn5Al ва Zn55Al бо титан ҷавҳаронидашуда меафзоянд, бузургии энергияи Гиббс бошад дар ин маврид кам мешавад. Ҳангоми бо титан ҷавҳаронидани хӯлаҳои ибтидоии руҳӣ-алюминийи Zn5Al ва Zn55Al гармиғунҷоиши хӯлаҳо меафзояд.

Натиҷаҳои ҳисоби тағйирёбии энталпия, энтропия ва энергияи Гиббс барои хӯлаҳои руҳӣ-алюминийи Zn5Al ва Zn55Al бо сирконий баъд аз 50 K дар ҷадвалҳои 7 ва 8 пешниҳод гардидаанд.

**Ҷадвали 7** – Вобастагии ҳароратии тағйирёбии функсияҳои термодинамикии ҳулаи рухӣ-алюминийи Zn5Al бо сирконий ва намунаи меъёрӣ (Cu тамғаи M00)

T, K	Намунаи меъёрӣ	Ҳулаи Zn5Al (1)	(1)+ 0,01% Zr	(1)+ 0,05%Zr	(1)+ 0,1% Zr	(1)+ 0,5%Zr
[ $H^0(T) - H^0(T_0^*)$ ], кҶ/кг барои ҳулаҳо						
300	0,71198	0,773949	0,745499	0,744217	0,739575	0,732016
350	20,1315	21,74397	21,00392	20,96885	20,84628	20,68758
400	39,8675	42,90353	41,51479	41,44609	41,21395	40,97114
450	59,8880	64,35731	62,33234	62,22835	61,88848	61,59062
500	80,1667	86,17662	83,50323	83,36102	82,91206	82,56905
[ $S^0(T) - S^0(T_0^*)$ ], кҶ/(кг · K) барои ҳулаҳо						
300	0,00238	0,002588	0,002493	0,002488	0,002473	0,002448
350	0,06223	0,067234	0,064941	0,064832	0,064453	0,063957
400	0,11493	0,123736	0,119709	0,119511	0,118839	0,118115
450	0,16209	0,174266	0,168741	0,168459	0,167533	0,166678
500	0,20481	0,220236	0,213345	0,212984	0,211828	0,210875
[ $G^0(T) - G^0(T_0^*)$ ], кҶ/кг барои ҳулаҳо						
300	-0,0022	-0,0024	-0,00231	-0,0023	-0,00229	-0,00226
350	-1,6518	-1,78782	-1,72538	-1,72248	-1,71219	-1,69729
400	-6,1071	-6,59073	-6,36898	-6,35836	-6,32156	-6,27503
450	-13,053	-14,0623	-13,601	-13,5784	-13,5015	-13,4145
500	-22,242	-23,9416	-23,1695	-23,1308	-23,0018	-22,8684

**Ҷадвали 8** – Вобастагии ҳароратии тағйирёбии функсияҳои термодинамикии ҳулаи рухӣ-алюминийи Zn55Al бо сирконий ва намунаи меъёрӣ (Cu тамғаи M00)

T, K	Намунаи меъёрӣ	Ҳулаи Zn55Al (2)	(2)+ 0,01% Zr	(2)+ 0,05% Zr	(2)+ 0,1% Zr	(2)+ 0,5% Zr
[ $H^0(T) - H^0(T_0^*)$ ], кҶ/кг барои ҳулаҳо						
300	0,711986	1,246724	1,240194	1,236747	1,224845	1,207396
350	20,13154	35,28014	35,09292	34,99492	34,61595	34,14897
400	39,8675	69,99668	69,62019	69,42471	68,61709	67,72048
450	59,88805	105,4404	104,8654	104,5691	103,2997	101,9684
500	80,16671	141,6535	140,8699	140,4693	138,7204	136,9355
[ $S^0(T) - S^0(T_0^*)$ ], кҶ/(кг · K) барои ҳулаҳо						
300	0,002381	0,004169	0,004147	0,004135	0,004095	0,004037
350	0,062238	0,109068	0,108489	0,108186	0,107018	0,105572
400	0,114937	0,201762	0,200678	0,200115	0,197803	0,19521
450	0,162092	0,285238	0,283687	0,282886	0,279487	0,27587
500	0,204819	0,361532	0,359541	0,358521	0,354112	0,34954
[ $G^0(T) - G^0(T_0^*)$ ], кҶ/кг барои ҳулаҳо						
300	-0,0022	-0,00386	-0,00384	-0,00383	-0,00379	-0,00374
350	-1,65181	-2,89365	-2,87836	-2,87034	-2,8404	-2,8014
400	-6,10716	-10,7081	-10,6511	-10,6213	-10,5042	-10,3635
450	-13,0534	-22,9167	-22,7937	-22,7297	-22,4696	-22,1733
500	-22,2427	-39,1125	-38,9008	-38,7913	-38,3356	-37,8344



Афзоиши гармиғунҷоиш, коэффитсиенти гармидихӣ, энталпия ва энтропияи хӯлаҳо аз миқдори титан ва сирконий бо таъсири тағйирдиҳии сохти таркибии хӯлаҳои рӯҳӣ-алюминийи вобастагӣ доранд, ки бо дигаргуншавии сохти дохилии хӯлаҳои руҳӣ-алюминийи  $Zn5Al$  ва  $Zn55Al$  алоқаманд мебошанд, яъне бо зиёдшавии дараҷаи гетерогении хӯлаҳои сегона.

### **Боби III. КИНЕТИКАИ РАВАНДИ ОКСИДШАВИИ ХҶЛАҶОИ РҶҶИ-АЛЮМИНИИ $Zn5Al$ ВА $Zn55Al$ БО ТИТАН ВА СИРКОНИИ ДАР ҶОЛАТИ САХТӢ**

Ин боб тадқиқоти таъсири ҳарорат ва таркиби химиявӣ ба кинетикаи оксидшавии хӯлаҳои руҳӣ-алюминийи  $Zn5Al$  ва  $Zn55Al$  бо титан ва сирконийро, дар ҳолати сахтӣ фаро гирифтааст.

Барои ҳалли мақсади дар пеш гузошташуда усули термогравиметриро бо пай дар пай баркушидани намунаҳо истифода бурдем. Тағйирёбии вазни хӯлаҳо аз рӯи ёзидани пружина бо ёрии катетометри КМ-8 ба кайд гирифтём. Бӯтаҳо (қутри 18-20 мм, баландии 25-26 мм) пеш аз таҷриба дар зери ҳарорати 1000-1200 °С дар муҳити оксидкунанда то вазни доимӣ тафсонид шуданд.

Ҷамчун намуна дар зер натиҷаҳои тадқиқоти кинетикаи оксидшавии хӯлаҳои руҳӣ-алюминийи  $Zn5Al$  ва  $Zn55Al$  бо титан дар хӯлаҳо, ки 0,01; 0,05; 0,1; 0,5 %-и вазн иловаи ҷавҳарӣ доштанд, оварда мешаванд. Параметрҳои кинетикӣ ва энергетикӣи раванди оксидшавии хӯлаҳои руҳӣ-алюминийи  $Zn5Al$  ва  $Zn55Al$  бо титан дар ҷадвали 9 оварда шудааст.

Қаҷхатаҳои кинетикӣи хӯлаи руҳӣ-алюминийи  $Zn5Al$ , ки бо титан ҷавҳаронид шудааст, раванди ёзондашудаи ташаккулёбии пардаи оксидиро нисбат ба хӯлаи ибтидоии  $Zn5Al$  тавсиф менамояд. Ин гуна механизми оксидшавӣ бо пайдо шудани оксидҳои тартиби мураккаб дар сатҳи хӯлаҳо фаҳмонида мешавад, ки бо хосиятҳои баландӣ муҳофизатӣ тавсиф карда мешаванд.

Динамикаи афзоиши вазни нисбии намунаҳо вобаста аз вақт ва ҳарорат барои хӯлаи руҳӣ-алюминийи  $Zn5Al$  бо титан ҷавҳаронидашуда нишон дод, ки бо баландшавии ҳарорат суръати оксидшавӣ меафзояд (ҷадвали 9). Ҷавҳаронидани хӯлаи  $Zn5Al$  бо титан энергияи фаъолшавии эҳтимолии оксидшавии хӯлаҳо зиёд мекунад. Инчунин муқаррар карда шуд, ки дар ҳароратҳои якхела барои хӯлаи руҳӣ-алюминийи  $Zn5Al$  бо иловаи 0,01; 0,05; 0,1 ва 0,5 %-и вазни титан, сурати оксидшавии ҳақиқӣ нисбати хӯлаи ибтидоии  $Zn5Al$  пасттар аст.

Сурати оксидшавии ҳақиқӣи хӯлаи руҳӣ-алюминийи  $Zn5Al$  вобаста аз ҳарорат дар ҳудудҳои аз  $2,10 \cdot 10^{-4}$  то  $3,62 \cdot 10^{-4}$   $\text{кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сония}^{-1}$  тағйир меёбад, ба таври муносиб дар ҳароратҳои 523К ва 623К. Энергияи фаъолшавии эҳтимолии раванди оксидшавӣ, ки бо тангенс кунчи моилии вобастагии бевоситаи  $\lg K - 1/T$  барои хӯлаи мазкур 128,84 кҶ/мол –ро ташкил медиҳад (ҷадвали 9).

Сурати оксидшавии ҳақиқӣи хӯлаи руҳӣ-алюминийи  $Zn5Al$  бо 0,5 %-и вазн титан ҷавҳаронидашуда вобаста аз ҳарорат дар ҳудудҳои аз  $1,34 \cdot 10^{-4}$  то  $3,08 \cdot 10^{-4}$   $\text{кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сония}^{-1}$  тағйир меёбад, ба таври муносиб дар ҳароратҳои 523К ва 623К. Энергияи фаъолшавии эҳтимолии раванди оксидшавӣ, ки бо тангенс кунчи моилии вобастагии бевоситаи  $\lg K - 1/T$  барои ин хӯла ба 179,90 кҶ/мол баробар мебошад.

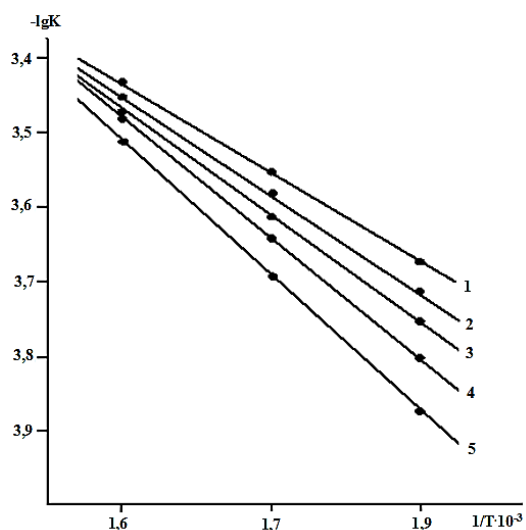
**Ҷадвали 9** – Параметрҳои кинетикӣ ва энергетикӣи раванди оксидшавии хӯлаи рӯҳӣ-алюминийи Zn5Al ва Zn55Al бо титан, дар ҳолати сахтӣ

Миқдори титан дар хӯлаҳо, %-и вазн	Ҳарорати оксидшавӣ, К	Сурати оксидшавии ҳақиқӣ $K \cdot 10^4$ , $\text{кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	Энергияи фаъолшавии эҳтимолии оксидшавӣ, кҶ/мол
Хӯлаи Zn5Al	523К	2,10	128,84
	573К	2,71	
	623К	3,62	
0,01	523К	1,91	137,84
	573К	2,56	
	623К	3,53	
0,05	523К	1,77	144,06
	573К	2,44	
	623К	3,38	
0,1	523К	1,58	158,12
	573К	2,27	
	623К	3,26	
0,5	523К	1,34	179,90
	573К	2,03	
	623К	3,08	
Хӯлаи Zn55Al	523К	2,13	154,51
	573К	2,81	
	623К	3,73	
0,01	523К	1,86	165,16
	573К	2,58	
	623К	3,62	
0,05	523К	1,72	174,18
	573К	2,43	
	623К	3,54	
0,1	523К	1,51	192,56
	573К	2,22	
	623К	3,37	
0,5	523К	1,28	203,82
	573К	2,02	
	623К	3,20	

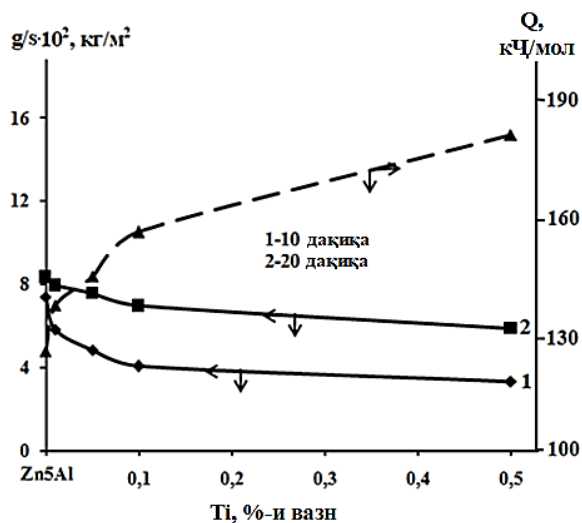
Вобастагии логарифмии  $\lg K - 1/T$  барои хӯлаи рӯҳӣ-алюминийи Zn5Al (1), ки 0,01 (2); 0,05 (3); 0,1 (4); 0,5 (5) %-и вазн титан дорад дар расми 4 оварда шудааст ва он тавсияи ростхаттаро дарбар мегирад.

Изохронҳои оксидшавии хӯлаи рӯҳӣ-алюминийи Zn5Al бо титан аз натиҷаҳои тадқиқоти кинетикаи оксидшавии хӯлаҳо сохта шудааст. Қаҷхатаҳо бо камшавии монотонии суръати оксидшавӣ, зиёд шудани ҳарорат ва миқдори титан, ҷӣ ҳангоми нигоҳдории хӯлаҳо дар фазои оксидкунанда то 10 дақиқа (қаҷхатаи 1), ҳамин тариқ ҳангоми нигоҳдории хӯлаҳо дар фазои оксидкунанда то 20 дақиқа

(каҷхатаи 2) тавсиф карда мешаванд, ки афзоиши қимати энергияи фаъоли эҳтимолӣ бо зиёд шудани миқдори титан аз он хабар медиҳад (расми 5).

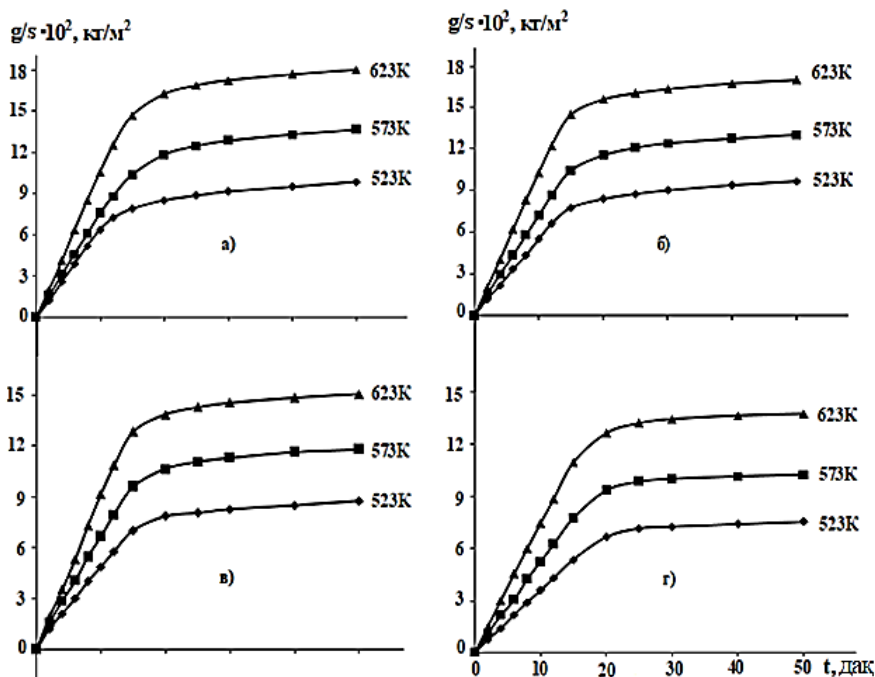


**Расми 4** - Вобастагии  $\lg K$  аз  $1/T$  барои хӯлаи рӯҳӣ-алюминийи Zn5Al (1) бо титан, %-и вазн: 0,01(2); 0,05(3); 0,1(4); 0,5(5)



**Расми 5** - Изохронҳои оксидшавии хӯлаи рӯҳӣ-алюминийи Zn5Al бо титан, дар ҳарорати 523K

Оксидшавии кинетикии квадратӣ ва алгоритмҳои онҳо барои хӯлаи Zn5Al бо титан (0,01...0,1 %-и вазн) дар координатаҳои  $(g/s)^2-t$  дар расми 6 оварда шудааст. Аз расми 6 дида мешавад, ки оксидшавии хӯлаҳо механизми гиперболий доранд. Тадқиқот дар ҳароратҳои 523K, 573K ва 623K гузаронида шуда буд.



**Расми 6.** Қаҷхатаҳои кинетикии квадратии оксидшавии хӯлаи рӯҳӣ-алюминийи Zn5Al (а) бо титан, %-и вазн: 0,01 (б); 0,05 (в); 0,1 (г), дар ҳолати сахтӣ

**Чадвали 10** – Натиҷаҳои коркарди математикии қачхатаҳои кинетикаи оксидшавии хӯлаҳои руҳӣ-алюминийи Zn5Al ва Zn55Al бо титан, дар ҳолати сахтӣ

Миқдори Ti дар хӯла, %-и вазн	Ҳарорати оксидшавӣ, К	Полиномҳои квадратии қачхатаҳои кинетикии оксидшавии хӯлаҳо	Коэффитсиенти регрессияи R
Хӯлаи Zn5Al	523K	$y = -0,5 \cdot 10^{-1}x^5 - 0,014x^3 + 0,126x^2 + 0,415x$	0,997
	573K	$y = -0,5 \cdot 10^{-1}x^5 - 0,015x^3 + 0,156x^2 + 0,422x$	0,999
	623K	$y = -0,6 \cdot 10^{-5}x^5 - 0,009x^3 + 0,105x^2 + 0,721x$	0,999
0,1	523K	$y = -0,6 \cdot 10^{-1}x^5 - 0,5 \cdot 10^{-5}x^4 - 0,002x^3 + 0,027x^2 + 0,296x$	0,999
	573K	$y = -0,6 \cdot 10^{-4}x^5 - 0,5 \cdot 10^{-4}x^4 - 0,001x^3 + 0,024x^2 + 0,441x$	0,998
	623K	$y = -0,6 \cdot 10^{-1}x^5 - 0,4 \cdot 10^{-1}x^4 - 0,004x^3 + 0,049x^2 + 0,576x$	0,999
0,5	523K	$y = -0,6 \cdot 10^{-1}x^5 - 0,5 \cdot 10^{-2}x^4 - 0,001x^3 + 0,016x^2 + 0,265x$	0,999
	573K	$y = -0,6 \cdot 10^{-3}x^5 - 0,5 \cdot 10^{-3}x^4 - 0,001x^3 + 0,021x^2 + 0,365x$	0,998
	623K	$y = -0,6 \cdot 10^{-2}x^5 - 0,5 \cdot 10^{-7}x^4 - 0,002x^3 + 0,028x^2 + 0,590x$	0,999
Хӯлаи Zn55Al	523K	$y = -0,6 \cdot 10^{-6}x^5 - 0,5 \cdot 10^{-6}x^4 - 0,002x^3 + 0,010x^2 + 0,660x$	0,997
	573K	$y = -0,7 \cdot 10^{-9}x^5 - 0,5 \cdot 10^{-8}x^4 - 0,003x^3 + 0,029x^2 + 0,688x$	0,999
	623K	$y = -0,6 \cdot 10^{-4}x^5 - 0,8 \cdot 10^{-2}x^3 + 0,095x^2 + 0,756x$	0,999
0,1	523K	$y = -0,6 \cdot 10^{-3}x^5 - 0,5 \cdot 10^{-3}x^4 - 0,001x^3 + 0,019x^2 + 0,281x$	0,999
	573K	$y = -0,6 \cdot 10^{-3}x^5 - 0,5 \cdot 10^{-5}x^4 - 0,002x^3 + 0,030x^2 + 0,409x$	0,999
	623K	$y = -0,6 \cdot 10^{-2}x^5 - 0,5 \cdot 10^{-8}x^4 - 0,003x^3 + 0,043x^2 + 0,595x$	0,999
0,5	523K	$y = -0,6 \cdot 10^{-4}x^5 - 0,6 \cdot 10^{-3}x^4 + 0,004x^2 + 0,280x$	0,998
	573K	$y = -0,6 \cdot 10^{-4}x^5 - 0,5 \cdot 10^{-3}x^4 - 0,001x^3 + 0,022x^2 + 0,343x$	0,998
	623K	$y = -0,6 \cdot 10^{-2}x^5 - 0,5 \cdot 10^{-9}x^4 - 0,003x^3 + 0,047x^2 + 0,490x$	0,999

Дар умум, нишон дода шудааст, ки афзоиши бо шиддати суръати оксидшавӣ дар вақт, дар аввали марҳалаҳои раванд ба назар мерасад. Пардаҳои оксидии ба вучудомадаи таркиби ZnO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ва Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, хосиятҳои химоявии пастро дар марҳалаҳои аввал доро мебошанд, бо зиёд шудани ғафсии пардаи оксидӣ раванди оксидшавӣ ба анҷом мерасад. Чавҳаронидани хӯлаҳои руҳӣ-алюминийи Zn5Al ва Zn55Al бо титан дар ҳудудҳои 0,01...0,5 %-и вазн суръати оксидшавии онҳоро паст мекунад, ки бо зиёдшавии энергияи ғафлшавии эҳтимолии раванди оксидшавӣ хотима меёбад.

Айнан бо ҳамин роҳ кинетикаи оксидшавии хӯлаҳои руҳӣ-алюминийи Zn5Al ва Zn55Al бо сирконий бо миқдорҳои: 0,01; 0,05; 0,1; 0,5 %-и вазн тадқиқ карда шуд. Дар чадвали 11 вобастагии энергияи ғафлшавии эҳтимолии раванди оксидшавии хӯлаҳои руҳӣ-алюминийи Zn5Al ва Zn55Al бо титан ва сирконий ҷамбастркардашуда овара шудаанд.

Маълумотҳои дар чадвал овардашуда нишон медиҳанд, ки қимати энергияи ғафлшавии эҳтимолии хӯлаҳо аз титан ба сирконий меафзояд. Раванди таъсири мутақобили компонентҳои оксидшавӣ бо хӯла дар 25-30 дақиқа аз ибтидои раванди

оксидшавӣ ба анҷом мерасад. Аз вобастагии ғайри хаттии қачхатаҳои кинетикии квадратии  $(g/s)^2-t$  оксидшавии хӯлаҳои рӯҳӣ-алюминийи Zn5Al ва Zn55Al –и бо титан ва сирконий чавҳаронидашуда хулоса баровардан мумкин аст, ки онҳо дар хатҳои рост намехобан. Пас гумон бурдан ҷой дорад, ки раванди оксидшавии хӯлаҳо аз рӯи қонунияти гиперболӣ мегузарад. Инро натиҷаҳои коркарди қачхатаҳои квадратии оксидшавии хӯлаҳо тасдиқ менамоянд (ҷадвали 10).

Дар умум, тадқиқотҳои иҷрокардашудаи кинетикаи оксидшавии хӯлаҳои рӯҳӣ-алюминийи Zn5Al ва Zn55Al бо титан ва сирконий нишон медиҳанд, ки иловаҳои титан ва сирконий дар дар ҳудудҳои омӯхташавандаи миқдорҳои (0,01...0,5 %-и вазн), оксидшавии хӯлаҳои ибтидоиро баланд мекунанд. Камшавии суръати оксидшавӣ бо зиёдшавии муносиби энергияи фаъолшавии эҳтимоли дар ҳама ҳолатҳо гуселонида шудааст.

**Ҷадвали 11 – Вобастагии энергияи фаъолшавии эҳтимолии раванди оксидшавии хӯлаҳои рӯҳӣ-алюминийи Zn5Al ва Zn55Al аз миқдори титан ва сирконий, дар ҳолати сахтӣ**

Ҳарорати оксидшавӣ, К	Компоненти чавҳарии хӯлаҳои Zn5Al ва Zn55Al	Энергияи фаъолшавии эҳтимоли, кҶ/мол				
		Миқдори иловаҳо дар хӯла, %-и вазн				
		-	0,01	0,05	0,1	0,5
523К	Zn5Al	128,84	-	-	-	-
573К	Ti		137,84	144,06	158,12	179,90
623К	Zr		135,88	147,38	164,22	187,84
523К	Zn55Al	154,51	-	-	-	-
573К	Ti		165,16	174,18	192,56	203,82
623К	Zr		160,06	171,07	190,64	208,26

Ҳамин тариқ, алоқаи бевосита байни оксидшавӣ ва хосиятҳои физико-химиявии элементҳои гуруҳи ҳаштуми Системаи даврӣ ҷой дорад.

### **Таъсири титан ва сирконий ба сахтии хӯлаҳои рӯҳӣ-алюминийи Zn5Al, Zn55Al**

Яке аз тавсифҳои нисбатан муҳим баъд аз устуворӣ сахтии масолеҳ ба ҳисоб меравад. Озмоиш ба сахтӣ ба усулҳои вайроннакуандаи (бе шикастан) санчиш ба ҳисоб меравад, ки дар бисёр ҳолатҳо чӯзро бо таъйиноти мустақим бе хароҷоти иловагӣ имкон медиҳад. Маълумоти ба таври кофӣ боэътимод оид ба алоқаи бузургҳои сахтӣ бо ҳудуди чоришавӣ, устуворӣ мавҷуданд, ин бошад, дар навбати худ, аз тайёр кардани намунаҳои маҳсус барои гузаронидани санчишҳои механикӣ ва иваз кардани онҳо нисбатан ба усулҳои содаи санчиш ба сахтӣ даст кашиданро имкон медиҳад.

Тадқиқоти сахтии хӯлаҳои рӯҳӣ-алюминийи Zn5Al ва Zn55Al (Галфан I ва Галфан II), ки бо титан ва сирконий чавҳаронида шудаанд ва коркарди ҳароратиро нагузаштаанд, аз рӯи усули Бринел гузаронида шуда буд. Тадқиқот дар асбоби тамғаи ТШ-2 гузаронида шудааст. Ба озмоиш намунаҳо бо ғафсии на зиёда аз 6 мм ва бо қутрҳои 16 мм фаро гирифта шуда буданд. Натиҷаҳои озмоиш дар ҷадвали 12 пешниҳод гардидааст.

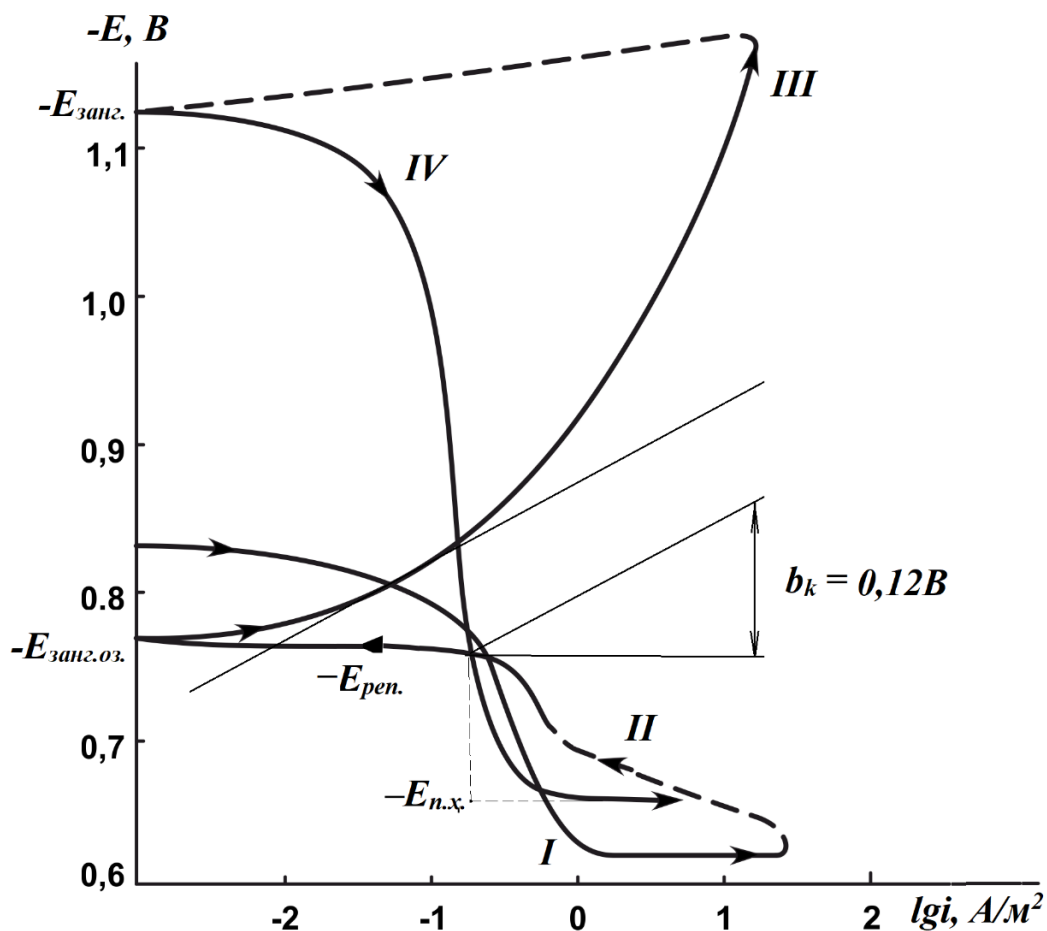
**Чадвали 12**–Сахтии хӯлаҳои рӯхӣ-алюминийи Zn5Al, Zn55Al бо титан ва сирконий

Миқдори титан ва сирконий дар хӯлаҳо, %-и вазн	Қутри из d, мм	Сахтӣ НВ, МПа	Ҳудуди устуворӣ $\sigma_B$ , МПа
Zn5Al (1)	2,8	454	136,2
(1) + 0,1% Ti	1,8	956	286,8
(1) + 0,5% Ti	1,6	1211	363,3
(1) + 0,1% Zr	2,1	700	210,0
(1) + 0,5% Zr	2	772	231,6
Zn55Al (2)	2,7	392	98,00
(2) + 0,1% Ti	2,1	700	175,0
(2) + 0,5% Ti	2	772	193,0
(2) + 0,1% Zr	2,8	582	145,5
(2) + 0,5% Zr	2,1	637	159,2

Мушоҳидаи чадвал нишон медиҳад, ки иловаҳои титан ва сирконий ба таркиби хӯлаҳои рӯхӣ-алюминий то 0,5 %-и вазн сахтии хӯлаҳои ибтидоиро зиёд мегардонад. Дар умум, иловаҳои титан ва сирконий ба таркиби хӯлаҳои Zn5Al ва Zn55Al сахтии онҳоро баланд мебардоранд, ки ин дар натиҷаи ба вучуд омадани пайвастагиҳои интерметалӣ боис мегардад.

**Боби IV. ТАДҚИҚОТИ РАФТОРИ ЗАНГЗАНИ-ЭЛЕКТРОХИМИЯВИИ ХҶЛАҶОИ РҶХҶ-АЛЮМИНИИ Zn5Al, Zn55Al БО ТИТАН ВА СИРКОНИИ**

Тадқиқоти рафтори зангзанӣ-электрохимиявии хӯлаҳои рӯхӣ-алюминийи Zn5Al ва Zn55Al, ки бо сирконий чавҳаронида шудаанд барои намунаҳо дар маҳлули хлориди натрий бо консентратсияҳои 0,03 ва 3,0% бо ёрии потенциостати ПИ-50.1.1, ки бо барномасозии ПР-8 ва худнависи ЛҚД-4 таҷҳизонида шуда буд, гузаронидем. Ҳарорати маҳлул дар чашмак 20°C бо ёрии термостати МЛШ-8 нигоҳ дошта шуд. Ҳамчун электроди муқоисавӣ хлорид-нукрагӣ ва электроди ёрирасон бошад платинагӣ истифода шуданд. Пеш аз ғўтонидани намуна ба маҳлули корӣ нўги онро бо қоғази сунбода тоза карда сайқал додем, аз равшанҳо тоза кардем, дар маҳлули 10%-и NaOH тезоб намудем, бодикқат бо спирт шуста сипас дар маҳлули электролити NaCl барои гузаронидани тадқиқот ғўтонидем. Тадқиқотро дар речаи потенциодинамикӣ бо суръати кушоиши потенциали 2 мВ·сония<sup>-1</sup> гузаронидем. Электродҳо бо таври потенциодинамикии анодӣ аз қимати муқарраршудаи потенциали статсионарӣ то яку якбора баланд шудани чараён (то қимати доимии чараён 2А) поляризатсия шуданд, сипас ба самти муқобил то қимати потенциали -1,1÷-1,2В, ки дар ин ҳолат барқароршавии пардаи оксидӣ ба вучуд меояд. Сипас намунаҳо аз нав ба самти мусбӣ то потенциали питингҳосилкунӣ поляризатсия шуданд. Аз қачхатаҳои потенциодинамикии ҳосилгардида тавсияҳои электрохимиявии асосии хӯлаҳо: потенциали зангзанӣ  $E_{занг}$  ва чараёни зангзанӣ  $i_{занг}$ , потенциалҳои питингҳосилкунӣ  $E_{п.х}$  ва репассиватсияро  $E_{реп}$  муайян карда шуданд (расми 7).



**Расми 7** - Поляризацияи пурраи потенциодинамикии ( $2 \text{ мВ} \cdot \text{с}^{-1}$ ) қачхатаи хӯлаи рӯҳӣ-алюминийи Zn5Al бо 0,01 %-и вазн сирконий, дар муҳити электролити 3,0% -и NaCl

Бо тарзи графикӣ бузургии  $E_{\text{rep.}}$  -ро чун потенциале, ки қатшавии яқум дар гашти муқобили қачхатаи анодӣ ё ҳамчун потенциале, ки ҳангоми он буриши гашти рост ва муқобили қачхатаи анодии поляризиционӣ мегузарад, муайян карда шудааст. Аз рӯи ифодаи  $K = i_{\text{занг.к}}$  суръати зангзанӣ муайян карда шуд, ки ин ҷо  $k$  - эквиваленти электрохимиявӣ, қимати ададии он барои рӯҳ  $1,22 \text{ г} \cdot \text{А}^{-1} \cdot \text{соат}^{-1}$  -ро ташил медиҳад. Амали ченкунии потенциалҳои электрохимиявӣ ба  $\pm 5 \div \pm 10 \text{ мВ}$  баробар гардид, зичии ҷараёни зангзанӣ  $(0,1-0,5) \cdot 10^{-4} \text{ А} \cdot \text{м}^{-2}$  -ро ташкил дод.

Таркиби химиявӣ ва натиҷаҳои тадқиқоти рафтори анодии хӯлаҳои рӯҳӣ-алюминийи Zn5Al ва Zn55Al, ки бо сирконий ҷавҳаронида шудаанд, дар ҷадвалҳои 13, 14 ва дар расмҳои 7–8 оварда шудаанд. Дар дақиқаҳои аввал баъди ғўтонидани намуна дар маҳлул яқбора тағйирёбии потенциал ба самти мусбӣ гузашт (ҷадвали 13), бо дараҷаи зиёдшавии консентратсияи хлорид-ион дар маҳлули электролит потенциали  $E_{\text{занг.оз.}}$  кам мешавад, ки аз бад гардидани устуворӣ ба зангзании хӯлаҳо дар муҳити электролити NaCl гувоҳӣ медиҳад. Агар потенциали  $E_{\text{занг.оз.}}$ -ро барои хӯлаҳои рӯҳӣ-алюминийи Zn5Al ва Zn55Al, ки бо сирконий ҷавҳаронида шудаанд муқоиса кнамем, қайд кардан мумкин аст, ки бузургии мусбии потенциал нисбатан барои хӯлаи рӯҳӣ-алюминийи Zn5Al дар муҳити 0,03%-аи электролити NaCl муносиб мебошад. Бузургии нисбатан манфии потенциали мазкур ба хӯлаи рӯҳӣ-алюминийи Zn55Al, дар муҳити 3,0%-аи электролити NaCl дахл дорад (ҷадвали 13).

**Чадвали 13** - Вобастагии потенциали (э.х.н.) зангзании озоди ( $-E_{занг.оз.}$ , В) хўлаҳои рўхй-алюминийи Zn5Al ва Zn55Al бо сирконий дар муддати вақт, дар муҳити электролити NaCl

Муҳити NaCl, %-и вазн	Миқдори сирконий дар хўлаҳо, %-и вазн	Вақти нигоҳдорӣ, дақиқа							
		0,3	0,6	2	4	10	20	40	60
0,03	Zn5Al	1,087	1,078	1,073	1,064	1,058	1,055	1,052	1,050
	0,01	0,672	0,657	0,650	0,630	0,614	0,606	0,584	0,584
	0,05	0,667	0,648	0,640	0,624	0,609	0,600	0,582	0,582
	0,1	0,651	0,638	0,632	0,616	0,602	0,590	0,570	0,570
	0,5	0,640	0,627	0,620	0,608	0,584	0,576	0,546	0,546
	Zn55Al	0,990	0,988	0,985	0,979	0,975	0,974	0,972	0,970
	0,01	0,754	0,744	0,740	0,726	0,702	0,688	0,660	0,650
	0,05	0,712	0,678	0,666	0,647	0,632	0,618	0,584	0,560
	0,1	0,702	0,672	0,662	0,639	0,614	0,595	0,546	0,525
	0,5	0,692	0,668	0,660	0,636	0,610	0,590	0,544	0,520
3,0	Zn5Al	1,140	1,132	1,116	1,109	1,107	1,104	1,100	1,153
	0,01	0,867	0,857	0,834	0,812	0,797	0,774	0,744	0,892
	0,05	0,862	0,850	0,824	0,796	0,780	0,750	0,740	0,887
	0,1	0,840	0,838	0,816	0,782	0,767	0,744	0,724	0,872
	0,5	0,806	0,786	0,764	0,740	0,728	0,694	0,660	0,846
	Zn55Al	1,038	1,032	1,029	1,026	1,024	1,023	1,021	1,020
	0,01	1,185	1,170	1,165	1,138	1,090	1,076	1,040	1,030
	0,05	1,174	1,152	1,142	1,124	1,080	1,066	1,020	0,980
	0,1	1,147	1,126	1,114	1,090	1,067	1,045	1,004	0,960
	0,5	1,135	1,108	1,092	1,067	1,040	1,021	0,984	0,950

Новобаста аз таркиби химиявӣ барои ҳамаи хўлаҳои тадқиқшаванда ҷойтағйирдиҳии потенциал ба минтақаи мусбӣ ба қайд гирифта шуд, ки бо ташаккулёбии пардаи оксидии муҳофизатӣ гуселонида мешавад, ки дар 35-45-ум дақиқаҳо аз ибтидоӣ ғўтонидани намунаҳо ба электролит ба анҷом мерасад ва аз таркиби химиявии хўлаҳо вобастагӣ дорад. Ҳамин тариқ, баъд аз 1 соати нигоҳ доштани электрод дар электролит, ки худ маҳлули 0,03% -и хлориди натрий мебошад, потенциали зангзании озоди хўлаи Zn55Al  $-0,880$  В -ро ташкил медиҳад, барои хўлае, ки бо 0,5%-и вазн сирконий ҷавҳаронида шудааст  $-0,520$  В ташкил медиҳад. Потенциали зангзании озоди хўлаи рўхй-алюминийи Zn55Al баъд аз 1 соати нигоҳдори дар маҳлули 3,0% -и хлориди натрий  $-1,022$  В, барои хўлае, ки бо 0,5 %-и вазн -и сирконий ҷавҳаронидашуда ба  $-0,950$  В баробар аст (чадвали 14).

Тавсияҳои асосии зангзанӣ-электрохимиявии хўлаҳои Zn5Al ва Zn55Al, бо сирконий ҷавҳаронидашуда (чадвали 14), аз он шаҳодат медиҳанд, ки иловаҳои сирконий бо миқдорҳои ночиз (0,01...0,5%-и вазн) потенциалҳои зангзании озод ва пинтингҳосилкунии хўлаҳоро ба минтақаи мусбӣ бузургӣҳо мекуҷонанд. Дар худудҳои 0,01...0,5%-и вазн бо сирконий ҷавҳаронидани хўлаҳои ибтидоии рўхй-алюминийи Zn5Al ва Zn55Al, суръати зангзании хўлаҳо дар муҳитҳои тадқиқшавандаи электролити NaCl ба 15-20% паст мешавад.

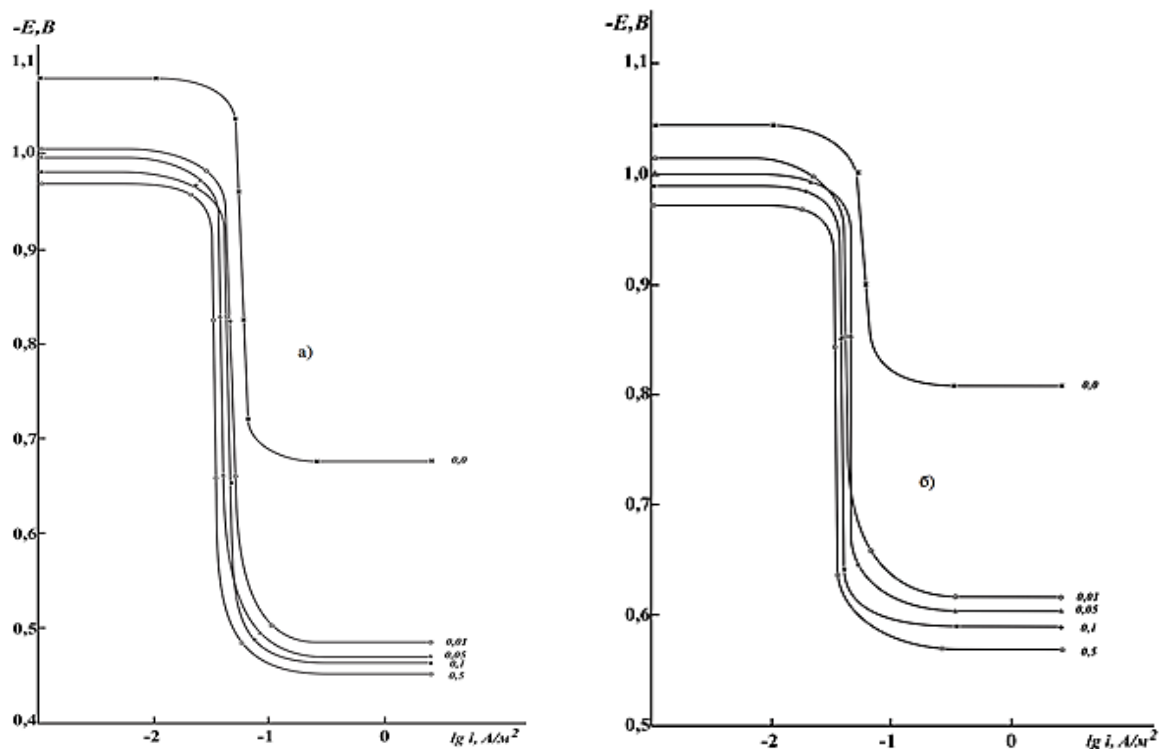


**Чадвали 14** – Тавсияҳои зангзанӣ-электрохимиявӣ хӯлаҳои рӯхӣ-алюминийи Zn5Al ва Zn55Al бо сирконий, дар муҳити электролити NaCl

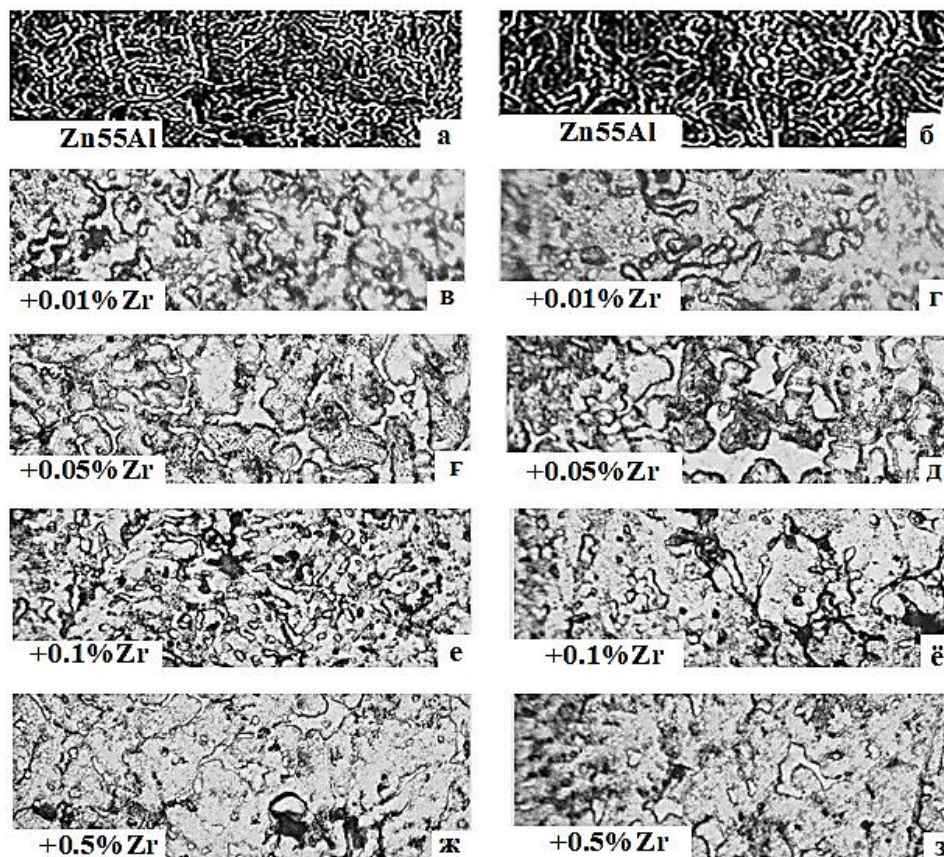
Муҳити NaCl, %-и вазн	Миқдори сирконий дар хӯлаҳо, %-и вазн	Потенциалҳои электрохимиявӣ, В (э.х.н.)				Суръати зангзанӣ	
		$-E_{\text{занг.оз.}}$	$-E_{\text{занг.}}$	$-E_{\text{п.х.}}$	$-E_{\text{реп.}}$	$i_{\text{занг.}} \cdot 10^2, \text{ А} \cdot \text{м}^2$	$K \cdot 10^3, \text{ г} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{соат}^{-1}$
0,03	Zn5Al	0,940	1,080	0,676	0,800	0,101	1,23
	0,01	0,565	1,005	0,485	0,540	0,022	0,26
	0,05	0,560	0,996	0,470	0,530	0,016	0,19
	0,1	0,540	0,980	0,465	0,520	0,012	0,14
	0,5	0,528	0,968	0,455	0,520	0,009	0,10
	Zn55Al	0,880	1,010	0,664	0,860	0,030	0,233
	0,01	0,570	0,980	0,470	0,530	0,024	0,187
	0,05	0,560	0,965	0,460	0,515	0,022	0,171
	0,1	0,525	0,950	0,450	0,500	0,020	0,156
	0,5	0,520	0,936	0,435	0,500	0,018	0,140
3,0	Zn5Al	1,064	1,180	0,700	0,900	0,110	1,34
	0,01	0,744	1,113	0,540	0,710	0,032	0,39
	0,05	0,740	1,110	0,530	0,705	0,027	0,33
	0,1	0,724	1,100	0,525	0,700	0,023	0,28
	0,5	0,660	1,060	0,520	0,690	0,018	0,22
	Zn55Al	1,022	1,044	0,810	0,924	0,038	0,296
	0,01	1,010	1,014	0,618	0,900	0,032	0,249
	0,05	0,980	1,000	0,605	0,890	0,029	0,226
	0,1	0,960	0,990	0,590	0,880	0,026	0,202
	0,5	0,950	0,976	0,570	0,880	0,025	0,195

Дар расми 8 шохаҳои анодии қачхатаҳои потенциодинамикии поляризатсионии хӯлаҳои рӯхӣ-алюминийи Zn5Al ва Zn55Al бо сирконий чавҳаронидашуда пешниҳод гардидаанд. Қачхатаҳои 2–5, ки ба хӯлаҳои бо сирконий (0,01–0,5 %-и вазн) чавҳаронидашуда мансубанд, бо бузургҳои мусбӣ потенциалҳои зангзанӣ ва питтингҳосилкунӣ нисбати қачхатаи 1 барои хӯлаҳои ибтидоии рӯхӣ-алюминийи Zn5Al ва Zn55Al тавсиф меёбанд. Ин аз нисбатан суръати пасти зангзании анодии хӯлаҳои чавҳаронидашуда гувоҳӣ медиҳад.

Иловаҳои сирконий ба сохти таркибии хӯлаи ибтидоии рӯхӣ-алюминийи Zn55Al таъсири тағйирдиҳандагӣ расонида андозаҳои доначаҳои таркиби фазаҳои маҳлулҳои сахти рӯхро дар алюминий ( $\alpha$ -Al) ва алюминийро дар рӯх ( $\gamma$ -Zn) майда мекунад (расми 9). Бо зиёд шудани миқдори сирконий инчунин курашаклшавии ташкилдиҳандаҳои фазаҳои нишондодашуда ба назар мерасад. Иловаҳои хурдтарини сирконий вазифаи тағйирдеҳи сохти таркибиро иҷро карда як миқдор сохти таркибии хӯлаҳои ибтидоии рӯхӣ-алюминийи Zn5Al ва Zn55Al –ро курашакл ва майдадона менамоянд (расми 9 в, г, ғ, д), ки ба беҳтар гаштани устуворӣ ба зангзании онҳо оварда мерасонад. Иловаҳои калони сирконий (0,5 %-и вазн) номатлуб ба ҳисоб мераванд, чунки сохти таркибии хӯлаҳои ибтидоии Zn5Al ва Zn55Al –ро дурушт менамоянд, ки дар натиҷа аз ғудохта фазаҳои интерметаллии таркиби номаълум ба намуди сӯзаншакли ҷудоғаштаҳои калон-калон булӯр мебаранд (расми 9 ж, з).



**Расми 8** – Қаҷхатаҳои поляризатсионии ( $2 мВ \cdot с^{-1}$ ) потенциодинамикии хӯлаҳои Zn5Al (а) ва Zn55Al (б), ки сирконий доранд: 0,01(2), 0,05(3), 0,1(4), 0,5(5) (%-и вазн), дар муҳити электролити 3,0%-и NaCl (б)



**Расми 9** – Соҳти таркибиҳои хӯлаи рӯҳӣ-алюминийи Zn5Al бо сирконий хангоми калон кардани 50 карата (а, в, г, е, ж) ва 100 карата (б, г, д, ё, з). Миқдори сирконий дар хӯла (%-и вазн) дар расмҳо нишон дода шудааст.

Айнан бо ҳамин тарз рафтори анодии хӯлаҳои рӯхӣ-алюминийи Zn5Al ва Zn55Al, ки бо 0,01–0,5 %-и вазни титан чавҳаронида шуда буданд дар муҳити 0,03 ва 3,0%-и электролити NaCl бо усули потенциостатикӣ дар речаи потенциодинамикӣ тадқиқ карда шуданд. Дар ҷадвали 15 вобастагии муқоисавии суръати зангзании хӯлаи Zn5Al ва Zn55Al аз миқдори титан ва сирконий дар муҳити электролити NaCl гирд оварда шудааст.

Маълум мегардад, ки барои хӯлаҳои рӯхӣ-алюминийи ибтидоии Zn5Al ва Zn55Al ҳангоми зиёд шудани концентратсияи титан ва сирконий, суръати зангзанӣ дар муҳити электролити NaCl паст мешавад. Суръати зангзании электрохимиявӣ хӯлаҳои ибтидоӣ ва хӯлаҳои бо титан ва сирконий чавҳаронидашуда бо зиёд шудани ҳиссаи хлорид-ион дар маҳлули электролити NaCl меафзояд (ҷадвали 15).

**Ҷадвали 15** – Вобастагии муқоисавии суръати зангзании ( $K \cdot 10^3$  г/м<sup>2</sup>·соат) хӯлаҳои рӯхӣ-алюминийи Zn5Al ва Zn55Al аз миқдори титан ва сирконий, дар муҳити электролити NaCl

Хӯла ва компоненти чавҳарии он	0,03% NaCl					3,0% NaCl				
	Миқдори иловаҳо дар хӯла, %-и вазн									
	–	0,01	0,05	0,1	0,5	–	0,01	0,05	0,1	0,5
Zn5Al	1,23	–	–	–	–	1,34	–	–	–	–
Ti		0,34	0,30	0,25	0,20		0,47	0,41	0,36	0,31
Zr		0,26	0,19	0,14	0,10		0,39	0,33	0,28	0,22
Zn55Al	0,233	–	–	–	–	0,296	–	–	–	–
Ti		0,218	0,202	0,187	0,171		0,265	0,257	0,249	0,241
Zr		0,187	0,171	0,156	0,140		0,249	0,226	0,202	0,195

Қиматҳои ба даст овардашудаи тавсияҳои зангзанӣ-электрохимиявӣ хӯлаҳои рӯхӣ-алюминийи Zn5Al ва Zn55Al бо титан ва сирконий имконият медиҳанд, ки онҳоро ба сифати рӯйпӯши анодӣ барои муҳофизати маснуот ва иншоотҳои пӯлодӣ аз зангзанӣ тавсия намоем.

## ХУЛОСАҲО

### I. Натиҷаҳои асосӣ ва хулосаҳо

1. Дар речаи «хунуқшавӣ» ҳосиятҳои физикаи гармои хӯлаҳои рӯхӣ-алюминийи Zn5Al ва Zn55Al бо титан ва сирконий омӯхта шудаанд. Функсияҳои термодинамикии (энталпия, энтропия ва энергияи Гиббс) хӯлаҳои рӯхӣ-алюминийи Zn5Al ва Zn55Al бо иловаҳои титан ва сирконий аз рӯйи қиматҳои гармиғунҷоиши онҳо ҳисоб карда шудаанд. Бо зиёдшавии миқдори иловаҳо (Ti, Zr) ба таркиби хӯлаҳои ибтидоии Zn5Al ва Zn55Al, инчунин баланд шудани ҳарорат нишон дода шудааст, ки гармиғунҷоиши нисбӣ, коэффитсиенти гармидиҳӣ, энталпия ва энтропияи хӯлаҳои рӯхӣ-алюминӣ меафзоянд, қимати энергияи Гиббс бошад, дар ин маврид паст мешавад.

2. Нишон дода шудааст, ки ҳангоми гузаштан аз хӯлаҳои ибтидоии Zn5Al ва Zn55Al ба хӯлаҳои бо титан чавҳаронидашуда бузургии гармиғунҷоиш меафзояд,

сипас ҳангоми гузаштан аз хӯлаҳои бо титан ба хӯлаҳои бо сирконий бузургии гармиғунҷоиш паст мешавад. Бузургии энталпия ва энтропияи хӯлаҳо ҳангоми гузариш аз хӯлаи ибтидоии рӯҳӣ-алюминийи  $Zn5Al$  ба хӯлаҳои бо титан меафзояд, ҳангоми аз хӯлаи ибтидоии рӯҳӣ-алюминийи  $Zn5Al$  ба хӯлаҳои бо сирконий бошад, паст мешавад, дар ин ҳол қимати энергияи Гиббс паст мешавад. Барои хӯлаи рӯҳӣ-алюминийи  $Zn55Al$  бо титан ва сирконий, инчунин қонуниятҳои дар боло овардашуда хос мебошанд. Муқоисаи бузургҳои гармиғунҷоиши хӯлаҳои ибтидоӣ нишон медиҳанд, ки гармиғунҷоиши нисбии хӯлаи рӯҳӣ-алюминийи  $Zn55Al$  назар аз хӯлаи  $Zn5Al$  баланд мебошад.

**3.** Кинетикаи оксидшавии хӯлаҳои рӯҳӣ-алюминийи системаҳои  $Zn5Al + (Ti, Zr)$  ва  $Zn55Al + (Ti, Zr)$  дар ҳолати сахтӣ бо усули термогравиметрӣ тадқиқ карда шудаанд. Муқаррар гардидааст, ки оксидшавии хӯлаҳо ба қонунияти гиперболий тобеъ мебошанд. Суръати оксидшавии ҳақиқӣ тартиби  $10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сония}^{-1}$  дорад. Муайян шудааст, ки қимати камтарини суръати оксидшавӣ ва бузургии калонтарини энергияи фаъол барои хӯлаи рӯҳӣ-алюминийи  $Zn5Al$  бо титан ва сирконий хос мебошад, қимати зиёдтарини суръати оксидшавӣ бошад, ба хӯлаи рӯҳӣ-алюминийи  $Zn55A$  бо титан ва сирконий дахл дорад. Нишон дода шудааст, ки компонентҳои чавҳарикунанда дар ҳудудҳои 0,01-0,5%-и вазн оксидшавии хӯлаҳои ибтидоии рӯҳӣ-алюминийро паст менамоянд.

**4.** Бо усули потенциостатикӣ дар муҳитҳои нейтралӣ (0,03; 3,0% NaCl) рафтори анодии хӯлаҳо тадқиқ карда шудааст. Муқаррар карда шудааст, ки миёни элементҳои чавҳарии хӯлаҳои рӯҳӣ-алюминийи  $Zn5Al$  ва  $Zn55Al$  нисбатан иловаи босамар сирконий ба ҳисоб меравад, чунки хӯлаҳои бо сирконий чавҳаронидашуда бо қиматҳои камтарини суръати зангзанӣ тавсиф карда мешаванд.

**5.** Нишон дода шудааст, ки бо меъёри зиёдшавии дараҷаи ғализии хлорид-ион дар электролит, потенциали  $E_{\text{занг.оз.}}$ -и хӯлаҳои рӯҳӣ-алюминӣ паст мегардад, ки бо афзоиши суръати зангзании хӯлаҳо дар муҳити электролити NaCl гуселонида мешавад.

**6.** Таркибҳои ба сифати рӯйпӯшҳои муҳофизатии анодии коркардашудаи хӯлаҳо бо нахустпатенти Ҷумҳурии Тоҷикистон №ТJ 000 аз 00 000000 соли 2022 муҳофизат карда шудаанд.

## **II. Тавсияҳо оид ба истифодабарии амалии натиҷаҳо**

Хӯлаҳои коркардашуда метавонанд ба сифати рӯйпӯши анодӣ барои муҳофизати маснуот ва иншооти пӯлодӣ, таркиби пӯлодии гуногун ва маснуоти истифодашавандае, ки ҳангоми таъсири зангзании муҳити табиат – ҳаво, обҳои баҳрӣ, наҳрӣ, кӯлӣ, қабатӣ, ҳосилшуда, хок, инчунин маҳлулҳои оби нейтралӣ ва сустишқор аз зангзанӣ истифода бурда шаванд. Ба сифати масолеҳи ғайриконструксионӣ хӯлаҳои рӯҳӣ-алюминийи коркардашуда метавонанд барои рехтани анодҳо-протекторҳо, барои тайёр кардани лаҳимҳо дар истеҳсолоти подшипникҳо ва элементҳои галванӣ ҳамчун рӯйпӯши варақаҳои пӯлодӣ истифода бурда шаванд. Инчунин натиҷаҳои кори рисола барои коркардҳои амалӣ дар соҳаҳои пешрафтаи масолеҳшиносии муосир ҳамчун дастури таълимӣ дар курсҳои профилии лексионӣ ва озмоиши муассисаҳои таълимии олӣ метавонанд истифода бурда шаванд. (Санад оид ба дар амал тадбиқ намудани натиҷаҳои кори рисола замима мегардад).

**МУНДАРИЧАИ АСОСИИ РИСОЛА ДАР НАШРИЯҲОИ  
ЗЕРИН БАЁН ГАРДИДААНД:**

***Мақолаҳое, ки дар маҷалаҳои ҚОА –и назди Президенти Ҷумҳурии Тоҷикистон  
тавсиягардида нашр шудаанд:***

- [1-А]. Ганиев И.Н., Алиев Дж.Н., **Аминов Ф.М.**, Нарзуллоев З.Ф. Влияние добавок титана на потенциал коррозии сплава Zn5Al в среде электролита NaCl // Вестник Таджикского технического университета, №1(33). –Душанбе: Деваштич, 2016. -С. 24-27.
- [2-А]. Ганиев И.Н., Алиев Дж.Н., **Аминов Ф.М.**, Сафаров С.Г. Влияние титана на удельную теплоемкость и изменение термодинамических функций сплава Zn55Al // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1: Естественные и технические науки №1. – 2019. – С. 26-31.
- [3-А]. Ганиев И.Н., Алиев Дж.Н., **Аминов Ф.М.** Влияние циркония на удельную теплоемкость и изменений термодинамических функций цинкового сплава Zn55Al // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. №4. Т. 22. -2020. - С.13-19.
- [4-А]. **Аминов Ф.М.** Оксидшавии ҳӯлаи рӯҳии Zn5Al бо сирконий дар ҳолати сахт, дар муҳити газӣ // Паёми Донишгоҳи технологии Тоҷикистон, № 1 (48). – 2022. –С. 24–31.
- [5-А]. Ganiev I.N., Aliev J.N., **Aminov F.M.** Influence of zirconium on microstructure and mechanical properties of zinc-aluminum alloys Zn5Al and Zn55Al // Polytechnic Bulletin. Series: Engineering research. № 2(58). 2022. - P.65-70.

***Ихтироот аз руи мавзӯи рисола:***

- [6-А]. Нахустпатенти Ҷумҳурии Тоҷикистон № ТҶ 1300. Ҳӯлаи руҳу-алюминий / аризадиханда ва дорандаи патент: Ганиев И.Н., Алиев Ҷ.Н., **Аминов Ф.М.**, Нарзуллоев З.Ф., Абдулло М.А. / №2101618; ариз. 27.12.2021, чоп. 26.09.2022, Бюл. 187, 2022. –бс.

***Интишоорот дар маводҳои конференсияҳои илмӣ:***

- [7-А]. **Аминов Ф.М.**, Ганиев И.Н., Алиев Дж.Н., Нарзуллоев З.Ф.. Анодное поведение сплавов Zn5Al и Zn55Al, легированных цирконием, в среде электролита NaCl// Материалы республиканской научно-практической конференции «Проблемы материаловедения в машиностроении Республики Таджикистан». АН Республики Таджикистан, Институт химии им. В.И. Никитина. - 2016. - С.80-83.
- [8-А]. **Аминов Ф.М.**, Ганиев И.Н., Алиев Дж.Н., Нарзуллоев З.Ф.. Влияние добавок титана на потенциал коррозии сплава Zn55Al в среде электролита NaCl. XIII Нумановские чтения. Достижения химической науки за 25 лет Государственной независимости Республики Таджикистан, посвящённые 70-летию образования Института химии имени В.И. Никитина Академии наук Республики Таджикистан. Душанбе - 2016. – С. 114-116.
- [9-А]. Алиев Дж.Н., Ганиев И.Н., **Аминов Ф.М.**, Нарзуллоев З.Ф. Влияние добавок титана на стационарный потенциал сплавов Zn5Al и Zn55Al, в среде электролита NaCl // Материалы XX Международной научно-практической конференции. Белгород –2016. № 11, часть 2 –С. 6-9.

- [10-А]. Алиев Дж.Н., **Аминов Ф.М.** Влияние добавок титана и циркония на твердость сплавов Zn5Al и Zn55Al // Материалы Респ. научн. практич. конф. «Перспективы развития естественных наук» посвященной реализации «Программы развития естественных, математических и технических наук на 2010-2020 годы». Российско – Таджикский (Славянский) университет. - 2018. - С. 65-68.
- [11-А] Ганиев И.Н., Нарзуллоев З.Ф., **Аминов Ф.М.**, Алиев Ч.Н. Анодное поведение сплава Zn5Al, легированного титаном, в среде электролита NaCl // Материалы Международной научно-практической конференции «перспективы использования материалов устойчивых к коррозии в промышленности республики Таджикистан», Институт химии им. В.И. Никитина. – 2018. - С.10-13.
- [12-А]. Одиназода Х.О., Алиев Дж.Н., **Аминов Ф.М.** Влияние циркония на изменение термодинамических функций сплава Zn55Al // Маҷмӯи маводҳои конференсияи байналмилалӣ илмӣ-амалии донишҷӯён, магистрон, унвонҷӯён ва олимони ҷавон “Муҳандис-2019”. Қисми I. ДТТ ба номи акад. М.Осимӣ. - 2019. -С. 69-73.
- [13-А]. Саидзода Х.О., Алиев Дж.Н., **Аминов Ф.М.** Влияние циркония на удельную теплоемкость и коэффициента теплоотдачи сплава Zn55Al // Маҷмӯи маводҳои конференсияи байналмилалӣ илмӣ-амалии донишҷӯён, магистрон, унвонҷӯён ва олимони ҷавон “Муҳандис-2019”. Қисми I. ДТТ ба номи акад. М.Осимӣ. - 2019. -С. 73-77.
- [14-А]. **Аминов Ф.М.**, Саидзода Р.Х., Алиев Дж.Н., Ганиев И.Н. Влияние титана на изменение термодинамических функций сплава Zn55Al //Материалы IV международной научной конференции «Вопросы физической и координационной химий», посвященной памяти докторов химических наук, профессоров Якубова Хаида Мухсиновича и Юсуфова Зухриддина Нуриддиновича. ТНУ. – 2019. - С. 71-75.
- [15-А]. **Аминов Ф.М.**, Одиназода Х.О., Алиев Дж.Н., Ганиев И.Н. Влияние титана на удельную теплоемкость и коэффициента теплоотдачи сплава Zn55Al // Материалы IV международной научной конференции «Вопросы физической и координационной химий», посвященной памяти докторов химических наук, профессоров Якубова Хаида Мухсиновича и Юсуфова Зухриддина Нуриддиновича. ТНУ. – 2019. - С. 103-107.
- [16-А]. **Аминов Ф.М.**, Алиев Дж.Н., Ганиев И.Н., Сафаров А.Г. Влияние титана на изменение термодинамических функций сплава Zn5Al // Материалы научно-практической республиканской конференции «Индустриализация – фактор развития экономики республики», Бустон – 2020. - С. 4-6.
- [17-А]. **Аминов Ф.М.**, Алиев Дж.Н., Ганиев И.Н. Окисление кислородом газовой фазы цинкового сплава Zn5Al с титаном, в твердом состоянии // Материалы X-ой научно-практической конференции «Ломоносовские чтения». Част-I. Естественные науки, Филиал МГУ имени М.В. Ломоносова в г. Душанбе. – 2020. – С. 37-41.
- [18-А]. Дж.Н. Алиев, **Ф.М. Аминов.** Влияние титана на микроструктуру и механические свойства цинково-алюминиевого сплава Zn5Al // Материалы международной научно-практической конференции на тему: «Современные проблемы металлургической промышленности». ТТУ им. акад. М.С. Осими. – 2021. – С. 98-103.

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РЕСПУБЛИКИ ТАДЖИКИСТАН  
ТАДЖИКСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
им. акад. М.С. Осими**

**УДК 669.5: 620.193**

*На правах рукописи*

**АМИНОВ Фируз Миррахимович**

**ВЛИЯНИЕ ТИТАНА И ЦИРКОНИЯ НА СВОЙСТВА  
ЦИНКОВО-АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ**

**Zn5Al, Zn55Al**

**АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук  
по специальности**

**05.02.01 – Материаловедение (05.02.01.02-в машиностроение)**

**Душанбе – 2023**

Работа выполнена на кафедре «Материаловедение, металлургические машины и оборудование» Таджикского технического университета им. акад. М.С. Осими и в лаборатории «Коррозионностойкие материалы» Института химии им. В.И. Никитина Национальной академии наук Таджикистана.

**Нучный руководитель:** **Алиев Чамшед Насридинович,**  
кандидат технических наук, доцент кафедры  
«Материаловедение, металлургические  
машины и оборудование» Таджикского  
технического университета им. акад. М.С.  
Осими

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

**Официальные оппоненты:** **Рузиев Джура Рахимназарович,**  
Доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры «Прикладная химия»,  
Таджикский национальный университет  
**Абдуназаров Сунатулло Сабзаалиевич,**  
Кандидат технических наук, декан факультета  
«Электроэнергетика» Института энергетики  
Таджикистана

**Ведущая организация:** Таджикский аграрный университет имени  
Ширишох Шохтемур

Защита состоится «\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г. в «\_\_» часов на заседании  
диссертационного совета 6D.KOA-028 при Таджикском техническом  
университете им. М.С. Осими по адресу: 734063, г. Душанбе, ул. академиков  
Раджабовых, 10. E-mail: adliya69@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте  
Таджикского технического университета им. М.С. Осими, [www.ttu.tj](http://www.ttu.tj)

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 года

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

**Бабаева А.Х.**



## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

***Важность и необходимость проведения исследования по теме диссертации.***

Научно-техническое развитие современности обеспечивает высокое развитие цветной металлургии. Цинк занимает четвертое место в общем объеме производства цветных металлов производственного назначения. Цинк и сплавы на его основе, различные цинковые соединения нашли широкое применение в качестве строительных и нестроительных материалов благодаря своим особым свойствам.

В качестве конструкционных материалов цинковые сплавы применяют особенно для приборостроения, в полиграфической и авиационной промышленности, в автомобильной промышленности, в судостроении, для изготовления бытовых изделий. Как неконструкционные материалы цинковые сплавы применяют для отливки анодов-протекторов, для приготовления соединительных припоев при производстве подшипников и гальванических элементов, в качестве покрытия стальных листов.

Цинково-алюминиевые сплавы широко применяются для покрытия металлических листов, изготовления полусырья и отливок. В последние годы сплавы на цинковой основе стали широко применяться для изготовления армированных литых протекторов, необходимых для защиты морских судов и металлоконструкций от коррозии.

***Уровень изученности научной проблемы, основы теоретико-методологического исследования.*** Среди металлов, используемых в различных отраслях промышленности, видное место занимает цинк. В качестве строительного материала нелегированный цинк широкого применения не нашел, так как не обладает комплексом достаточных механических, физических и технологических свойств. Но дополнительное обогащение по различными элементами сильно усиливает вышеуказанные свойства и характеристики.

В связи с отсутствием в литературе сведений о влиянии титана и циркония на физические свойства, тепловые и термодинамические функции, кинетику высокотемпературного окисления и коррозионно-электрохимическое поведение цинково-алюминиевых сплавов, целью настоящей работы является заполнить пробел о свойствах цинков и их сплавов. Работа проводилась в рамках темы «Национальная стратегия развития Таджикистана на период до 2030 года» по инновациям (продвижение инноваций во все сферы социально-экономической жизни страны).

***Цель исследований*** разработка стабильных составов сплавов  $Zn_{5}Al$  и  $Zn_{55}Al$  с титаном и цирконием, которые используются в качестве анодного покрытия для защиты металлических конструкций, особенно стальных конструкций и сооружений от коррозии.

***Объект исследования.*** В качестве объектов исследования рассмотрены цинк марки Ц1 (ГОСТ 3640-94), алюминий марки А7 (ГОСТ 11069-2001) и

алюминиевый сплав с титаном (2,5 % Ti) и цирконием (2 % Zr), цинковые сплавы различного назначения.

**Предмет исследования:** в качестве объекта исследования рассматриваются сплавы Zn5Al, Zn55Al, легированные титаном и цирконием.

**Задачи исследования:**

- исследование термодинамических свойств и теплофизики сплавов алюминия Zn5Al и Zn55Al с титаном и цирконием;
- изучение кинетики и механизма процессов окисления сплавов в твердом состоянии;
- определение закономерностей изменения анодных характеристик сплавов Zn5Al и Zn55Al, легированных титаном и цирконием, в среде электролита NaCl;
- обработка стабильных композиций цинково-алюминиевых сплавов Zn5Al и Zn55Al с титаном и цирконием и их защита первым патентом РТ;
- проведение металлографической анализ сплавов Zn5Al и Zn55Al с титаном и цирконием на монокулярном микроскопе марки БИОМЕД-1 (Украина);
- определение влияния титана и циркония на твердость и прочность сплавов Zn5Al и Zn55Al, легированных титаном и цирконием, с помощью твердомера ТШ-2.

**Методы исследования:**

- микрорентгеноспектральный анализ составов сплавов в монокулярном микроскопе БИОМЕД-1;
- теплофизические исследования сплавов в режиме «охлаждения»;
- термогравиметрическое исследование кинетики окисления сплавов;
- потенциостатические исследования сплавов с помощью потенциостата ПИ-50.1.1, в потенциодинамическом режиме;
- исследование твердости и пределов стойкости сплавов инструментом ТШ-2.

**Область научных интересов**– металлургия и материаловедение сплавов. Диссертационная работа выполнялась по двум научным направлениям: материаловедение (в машиностроении) и металлургия черных, цветных и редких металлов.

**Этапы исследования.** Диссертационная работа проводилась в три этапа, в период с 2016 по 2022 годы. При выполнении первого этапа (2016-2018 гг.) разъяснение имеющихся в литературе методических материалов по вопросам, которые необходимо было решить в развитии материаловедения и металлургии черных, цветных и редких металлов, составление технического задания, обзор методической литературы по проблеме исследования.

В ходе выполнения второго этапа (2018-2020 гг.) были кратко изложены общие идеи исследования, выявлена решаемая научная проблема и четко сформулированы гипотезы исследования, наиболее важные аспекты диссертации, которые обсуждались на различных международных научно-практических конференциях, разрабатывались и апробировались.

На третьем этапе (2020-2022 годы) мы провели экспериментальную проверку идей диссертации, а также систематизацию материалов исследования.

**Основная база экспериментальных данных** - эксперименты за 2016-2022 годы в базе данных кафедры "Материаловедение, машины и металлургическое оборудование" ДТТ им. акад. М.С. Осими и в лаборатории «Коррозионностойкие материалы» Института химии им. В.И. Никитина Национальной академии наук Таджикистана. В экспериментальные исследования были включены сплавы Zn5Al, Zn55Al с титаном и цирконием.

***Достоверность результатов диссертации.***

- опора на принципиальные положения теории и методики исследования цинково-алюминиевых сплавов Zn5Al и Zn55Al, легированных титаном и цирконием;

- анализ существующей проблемы с точки зрения как теории, так и практики исследования цинково-алюминиевых сплавов Zn5Al и Zn55Al, легированных титаном и цирконием;

- комплекс методов исследования с многократным анализом основных результатов исследований цинково-алюминиевых сплавов Zn5Al и Zn55Al, легированных титаном и цирконием.

***Научная новизна работы.*** На основе углубленного анализа литературных данных и экспериментальных исследований определены температурные зависимости теплофизических и термодинамических функций сплавов Zn5Al и Zn55Al, легированных титаном и цирконием. Показаны закономерности процессов высокотемпературного окисления тройных цинково-алюминиевых сплавов с титаном и цирконием в фазовой среде, в жестких условиях. Закономерности изменения анодных характеристик цинково-алюминиевых сплавов Zn5Al и Zn55Al в электролитной среде NaCl определяются количеством титана и циркония.

***Теоретическая ценность исследования*** заключается в установлении зависимости термодинамических функций, теплоемкости, энергетических и кинетических характеристик цинково-алюминиевых сплавов Zn5Al и Zn55Al, легированных титаном и цирконием.

***Практическая ценность*** исследований заключается в разработке стабильных составов Zn5Al и Zn55Al цинково-алюминиевых сплавов, легированных титаном и цирконием.

***Позиции, которые выносятся на защиту:***

- результаты исследований теплофизических свойств, температурных зависимостей термодинамических функций цинково-алюминиевых сплавов Zn5Al и Zn55Al, легированных титаном и цирконием;

- закономерности изменения энергетических и кинетических параметров процесса окисления цинково-алюминиевых сплавов Zn5Al и Zn55Al, легированных титаном и цирконием;

- определение механизма окисления цинково-алюминиевых сплавов в твердом состоянии;

- обоснование изменения рекомендаций по аноду из цинково-алюминиевых сплавов Zn5Al и Zn55Al, с титаном и цирконием в зависимости от среды NaCl и количества добавок.

**Личный вклад соискателя** заключается в анализе данных литературных источников, проведении опытов в лабораториях, решении задач исследования и анализе полученных результатов, а также в составлении основных положений и выводов диссертации.

**Утверждение данных диссертации и ее прикладных результатов.** Результаты диссертационной работы обсуждались и докладывались на следующих научных конференциях: Республиканская научно-практическая конференция «Вопросы материаловедения в машиностроении Республики Таджикистан», посвященная «Дню химика» и 80-летию доктора технических наук профессор, академик Международной инженерной академии Вахобов Анвар Вахобович. (Душанбе 2016 г.); XIII Нумановские чтения «Достижения химической науки за 25 лет независимости Республики Таджикистан», посвященные 70-летию образования Института химии Академии наук Республики Таджикистан (Душанбе, 2016 г.); XX международная научно-практическая конференция «Современные тенденции развития науки и технологий» (Белгород, 2016 г.); Республиканская научно-практическая конференция «Перспективное развитие естественных наук», посвященная реализации «Программы развития естественных, математических и технических наук на 2010-2020 годы». Российско-Таджикский (Славянский) Университет (Душанбе, 2018 г.). Международная научно-практическая конференция на тему «Перспективы использования коррозионно-стойких материалов в промышленности Республики Таджикистан» (Душанбе, 2018 г.). Международная научно-практическая конференция студентов, магистров, соискателей и молодых ученых «Инженер-2019» (Душанбе, 2019). IV международная научная конференция: «Проблемы физической и координационной химии», посвященная чествованию памяти докторов химических наук, профессоров Хамида Мухсиновича Якубова и Зухуриддина Нуриддиновича Юсуфова (Душанбе, 2019 г.). Республиканская научно-практическая конференция «Индустриализация – фактор развития экономики Республики» (г.Ходжанд, 2020 г.). 10-я научно-практическая конференция «Ломоносовские чтения» (Душанбе, 2020 г.). Международная научно-практическая конференция «Современные проблемы металлургической отрасли», посвященная провозглашению четвертой национальной цели – ускоренной индустриализации страны и 25-летию образования кафедры «Металлургия» (Душанбе, 2021 г.).

**Публикация результатов диссертации.** По результатам исследований опубликовано 17 научных работ, 5 из которых опубликованы в рекомендованных журналах ВАК при Президенте РТ, получен 2 патента РТ по теме диссертации.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и приложения. Работа представлена на 187 страницах компьютерной печати и включает 57 таблиц и 60 рисунков. Список литературы включает 138 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Во введении** излагаются важные вопросы исследования, а также его предпосылки, обосновывается актуальность диссертации, отражается практическая значимость и научная новизна диссертации, перечисляются важные положения, которые выносятся на защиту.

**В первой главе** описаны основные свойства и области применения цинка и его сплавов; теплофизические свойства цинка, алюминия, титана, циркония и цинково-алюминиевых сплавов; характеристики окисления цинка и цинково-алюминиевых сплавов; коррозия цинка и цинково-алюминиевых сплавов. Обзор литературы по этому вопросу показывает, что аналогичные физико-химические исследования проводились с участием сплавов Zn5Al и Zn55Al, легированных щелочноземельными и редкоземельными металлами. Однако анализ литературы и поиск в Интернете подтверждают отсутствие экспериментальных данных по физико-химическим исследованиям сплавов Zn5Al и Zn55Al с переходными металлами (титан, цирконий).

Широкое использование сплавов в основе цинка в различных отраслях промышленности требует систематических физико-химических исследований сплавов Zn5Al и Zn55Al, легированных титаном и цирконием. Обзор литературы свидетельствует о том, что термические, термодинамические, кинетические и анодные свойства сплавов Zn5Al и Zn55Al с указанными переходными металлами практически не изучались.

Из вышеизложенного следует, что изучение относительного термического расширения и изменения термодинамических функций, кинетики окисления и анодного поведения сплавов Zn5Al и Zn55Al с титаном и цирконием, используемых в качестве анодных покрытий металлических изделий и конструкций, является актуальной задачей: задача имеет практическое и фундаментальное значение.

**Во второй главе** представлены экспериментальные результаты исследования температурной зависимости теплоёмкости и изменения термодинамических функций цинково-алюминиевых сплавов Zn5Al, Zn55Al с титаном и цирконием.

**Третья глава** посвящена исследованиям кинетики окисления цинково-алюминиевых сплавов Zn5Al и Zn55Al с титаном и цирконием в твердом состоянии в среде электролита NaCl.

**В четвертой главе** диссертации представлены результаты экспериментального исследования коррозионно-электрохимического поведения цинково-алюминиевых сплавов Zn5Al, Zn55Al с титаном и цирконием. Диссертация заканчивается общими выводами, списком литературы, цитируемой литературой и приложением.

## Глава II. ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ТЕПЛОЁМКОСТИ И ИЗМЕНЕНИЯ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ Zn5Al, Zn55Al СПЛАВОВ ЦИНКА С ТИТАНОМ И ЦИРКОНИЕМ

В этой главе диссертации исследованы удельная теплоемкость и термодинамические функции Zn5Al и Zn55Al, легированных титаном и цирконием, на основе удельной теплоемкости стандартного образца меди с использованием скорости охлаждения образцов.

Расчет теплопередачи обоснован следующим образом. Ранее нагретое тело после охлаждения теряет массу  $m$  на  $dT$  градусов, количество теплоты  $\delta Q$  рассчитывалось по следующему выражению

$$\delta Q = C_p^0 m dT, \quad (1)$$

здесь  $C_p^0$  — удельная теплоемкость вещества, из которого состоит тело.

Учитывая, что энергия теряется с поверхности тела, считается, что количество теплоты, теряемое  $\delta Q_S$  с поверхности тела в интервале времени  $dt$ , равно разности температур окружающей среды  $T_0$  и тела  $T$ , поверхности площадью  $S$  и времени

$$\delta Q_S = \alpha(T - T_0) \cdot S dt. \quad (2)$$

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  при перепаде температур 1К в Вт/(м<sup>2</sup>•К) не всегда постоянен и зависит от перепада температур, вследствие чего закон считается приближительным. Рассматривая температуры потока как вектор, следует учитывать, что она течет вертикально к поверхности, над которой за единицу тепловой высоты проходит  $\alpha$ -количество температуры в единицу времени, приходящееся на 1 м<sup>2</sup> поверхности. На тепловой поток влияет ряд факторов: геометрия тела, состояние поверхности и направление обтекание; тип конвекции и режим потока; вид теплоносителя и его температура. Поэтому функция процесса теплообмена  $\alpha$  не считается табличной величиной,  $\alpha$  далее рассчитывается как численное значение экспериментальным методом.

Если тело излучает такое тепло, что температура всех его точек изменяется одинаково, то справедливым можно считать следующее уравнение

$$\delta Q = \delta Q_S \text{ в } C_p^0 m dT = \alpha(T - T_0) S dt. \quad (3)$$

Выражение (3) можно представить в следующем виде

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

Если предположить, что  $C_p^0$ ,  $\alpha$ ,  $T$  и  $T_0$  в малых интервалах температур не зависят от координат точек поверхности образца, нагретого до одной и той же температуры окружающей среды, то соотношение (4) для двух образцов принимает следующий вид:

$$C_{p_1}^0 m_1 s_1 \alpha_1 \left( \frac{dT}{dt} \right)_1 = C_{p_2}^0 m_2 s_2 \alpha_2 \left( \frac{dT}{dt} \right)_2, \quad (5)$$

Используем это уравнение для двух образцов, один из которых является эталоном и с одинаковыми размерами и состоянием поверхностей ( $S_1=S_2$ ),

можно считать, что коэффициенты нагрева равны  $\alpha_1 = \alpha_2$  и выражаются соотношением

$$C_{p_1}^0 m_1 \left( \frac{dT}{dt} \right)_1 = C_{p_2}^0 m_2 \left( \frac{dT}{dt} \right)_2, \quad (6)$$

Из этого уравнения по удельной теплоёмкости эталона  $C_{p_1}^0$ , зная скорость охлаждения эталонного образца  $\left( \frac{dT}{dt} \right)_1$ , испытуемого образца  $\left( \frac{dT}{dt} \right)_2$  и массы образцов  $m_1$  и  $m_2$ , можно рассчитать теплоёмкость неизвестного вещества  $C_{p_2}^0$ .

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

С помощью этого метода результаты, полученные для меди и алюминия, согласуются с данными, имеющимися в литературных источниках.

Исследование зависимости теплоёмкости и изменения термодинамических функций сплавов Zn5Al и Zn55Al с титаном и цирконием проведено по указанной выше методике. Зависимость температуры образца от времени охлаждения для цинково-алюминиевых сплавов Zn5Al и Zn55Al с титаном и цирконием полученная в ходе эксперимента представлена на рис. 1 и описываются следующим уравнением

$$T = T_0 + \frac{1}{2} \left[ (T_1 - T_0) e^{-t/\tau_1} + (T_2 - T_0) e^{-t/\tau_2} \right]. \quad (8)$$

При дифференцировании по  $t$  уравнения (8) для скорости охлаждения образцов сплавов Zn5Al и Zn55Al с титаном и цирконием получим

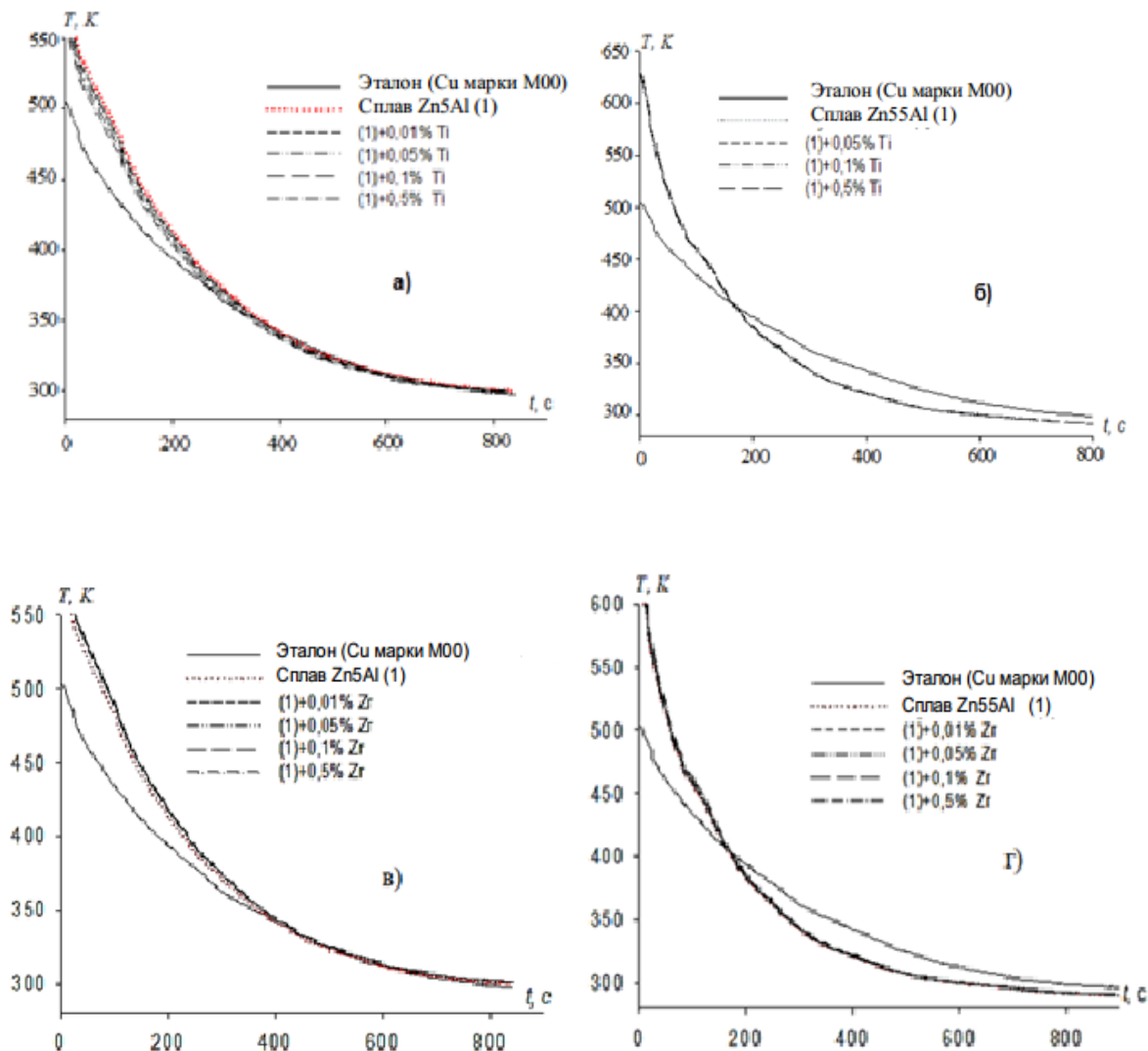
$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{2} \left[ -\left( \frac{T_1 - T_0}{\tau_1} \right) e^{-t/\tau_1} - \left( \frac{T_2 - T_0}{\tau_2} \right) e^{-t/\tau_2} \right]. \quad (9)$$

В процессе выполнения работы изучалось влияние титана и циркония на теплофизические свойства и термодинамические функции цинково-алюминиевых сплавов Zn5Al и Zn55Al. Для получения сплавов использовали цинк марки Ц1 (ГОСТ 3640-94), алюминий марки А7 (ГОСТ 11069 - 2001) и его сплавы с титаном и цирконием. Сплавы алюминия с титаном (2,5 % Ti) и цирконием (2 % Zr) были предварительно синтезированы под давлением инертного газа в вакуумной печи. Количество титана и циркония в составе цинково-алюминиевых сплавов Zn5Al и Zn55Al в % по массе составило: 0,05; 0,01; 0,1; 0,5. Зерно взвешивали на аналитических весах АРВ-200 с точностью  $0,1 \cdot 10^{-6}$  кг. Приготовление порошка осуществлялось с учетом металлических порошков. Электродпечь сопротивления СШОЛ нагревалась до  $850^\circ\text{C}$  и плавилась алюминий и цинк, затем в ее состав добавляли легированный титан. Мы сделали аналогичные сплавы с цирконием. Выдержав некоторое время и при необходимой температуре 30 минут, мы сняли его с плиты и тщательно перемешали расплав. Из полученного расплава в графитовом кристаллизаторе были получены образцы диаметром 16 мм и длиной 30 мм для изучения

исследования температурной зависимости теплоёмкости и изменения термодинамических функций цинково-алюминиевых сплавов Zn5Al, Zn55Al с титаном и цирконием.

Состав полученных сплавов выборочно проверяли с помощью химического анализа, взвешивали образцы до и после отжига. Затем сплавы анализировали на разницу в массе, которая составляла не более 2% (относительная) до и после плавки.

На основании уравнения (9) были рассчитаны скорости охлаждения образцов из цинково-алюминиевых сплавов Zn5Al, Zn55Al и стандартного образца, которые представлены на графиках рис. 1.



**Рис. 1** – Кривые температурной зависимости образцов из цинково-алюминиевых сплавов Zn5Al, Zn55Al с титаном (а, б) и цирконием (в, г) от времени охлаждения

В таблицах 1 и 2 приведены значения коэффициентов  $\Delta T_{01}$ ,  $t_1$ ,  $\Delta T_{02}$ ,  $t_2$  в уравнении (9) для исследуемых сплавов.

Используя уравнение (7) и программу *Sigma Plot*, мы получили следующее уравнение для температурной зависимости относительного теплового сжатия



сплавов Zn5Al и Zn55Al, легированных титаном и цирконием, в интервале температур 300-600 К.

$$C^0_P = a + bT^2 + cT^3 + dT^4. \quad (10)$$

Значения коэффициентов в уравнении (10) представлены в таблицах 3 и 4.

**Табл. 1** – Значения коэффициентов  $\Delta T_1$ ,  $t_1$ ,  $\Delta T_2$ ,  $t_2$  уравнения (9) для цинково-алюминиевых сплавов Zn5Al и Zn55Al с титаном и стандартного образца (Cu марки M00).

Количество титана в сплавах, % по массе	$T_1 - T_0$ , К	$t_1$ , с	$T_2 - T_0$ , К	$t_2$ , с	$(T_1 - T_0)/\tau_1$ , К/с	$(T_2 - T_0)/\tau_2$ , К/с	$T_0$ , К
Сплавы Zn5Al	143,12	234,33	143,39	234,33	0,6107	0,6119	290,56
0,01	140,549	236,35	140,67	236,35	0,5947	0,5952	289,36
0,05	139,11	236,35	139,23	236,35	0,5886	0,5891	289,20
0,1	136,25	236,35	136,36	236,35	0,5765	0,5770	288,87
0,5	133,38	236,35	133,49	236,35	0,5643	0,5648	288,54
Сплавы Zn55Al	57,04	20,70	290,44	180,01	2,7552	1,6135	288,43
0,05	57,613	20,70	293,35	180,01	2,7827	1,6297	288,59
0,1	57,56	20,70	293,06	180,01	2,7800	1,6280	288,57
0,5	58,07	20,70	295,67	180,01	2,8048	1,6426	288,71
Эталон	18,42	19,19	208,99	316,11	0,9595	0,6612	281,98

**Табл. 2** – Значения коэффициентов  $\Delta T_1$ ,  $t_1$ ,  $\Delta T_2$ ,  $t_2$  уравнения (9) для цинково-алюминиевых сплавов Zn5Al и Zn55Al с цирконием и стандартного образца (Cu марки M00)

Количество циркония в сплавах, % по массе	$T_1 - T_0$ , К	$t_1$ , с	$T_2 - T_0$ , К	$t_2$ , с	$(T_1 - T_0)/\tau_1$ , К/с	$(T_2 - T_0)/\tau_2$ , К/с	$T_0$ , К
Сплавы Zn5Al	143,12	234,33	143,39	234,33	0,6107	0,6119	290,56
0,01	147,40	235,16	147,88	235,16	0,6269	0,6289	290,72
0,05	148,76	235,97	148,13	235,97	0,6305	0,6277	290,37
0,1	148,20	235,31	148,99	235,31	0,6298	0,6332	290,77
0,5	148,97	235,99	149,24	235,99	0,6312	0,6324	290,51
Сплавы Zn55Al	57,04	20,70	290,44	180,01	2,7552	1,6135	288,43
0,01	57,32	20,70	291,89	180,01	2,7689	1,6216	288,51
0,05	57,50	20,70	292,77	180,01	2,7772	1,6264	288,56
0,1	58,18	20,70	296,25	180,01	2,8103	1,6458	288,74
0,5	58,87	20,70	299,74	180,01	2,8433	1,6652	288,92
Эталон	18,42	19,19	208,99	316,11	0,9595	0,6612	281,98

**Табл. 3** – Значения коэффициентов  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  уравнения (10) для цинково-алюминиевых сплавов Zn5Al и Zn55Al с титаном и стандартного образца (Cu марки М00)

Количество титана в сплавах, % по массе	$a$ , Дж/(кг·К)	$b \cdot 10^{-4}$ , Дж/(кг·К <sup>2</sup> )	$c \cdot 10^{-7}$ , Дж/(кг·К <sup>3</sup> )	$d \cdot 10^{-10}$ , Дж/(кг·К <sup>4</sup> )	Коэффициент корреляция R <sup>2</sup>
Сплавы Zn5Al	0,4916	-5,90	14,2	-8,90	0.999
0,01	0,3255	5,18	-9,31	8,01	0.999
0,05	0,3274	5,34	-9,67	8,34	0.999
0,1	0,3311	5,68	-1,05	9,07	0.999
0,5	0,3348	6,06	-11,3	9,87	0.999
Сплавы Zn55Al	0,6160	1,28	2,35	$-0,522 \cdot 10^{-11}$	0.999
0,01	0,6102	1,27	2,28	$-0,502 \cdot 10^{-11}$	0.999
0,05	0,6509	-1,27	7,56	-4,10	0.999
0,1	0,6057	1,26	2,22	$-0,486 \cdot 10^{-11}$	0.999
0,5	0,6057	1,26	2,22	$-0,486 \cdot 10^{-11}$	0.999
Эталон	0,325	2,75	-2,87	1,42	1.00

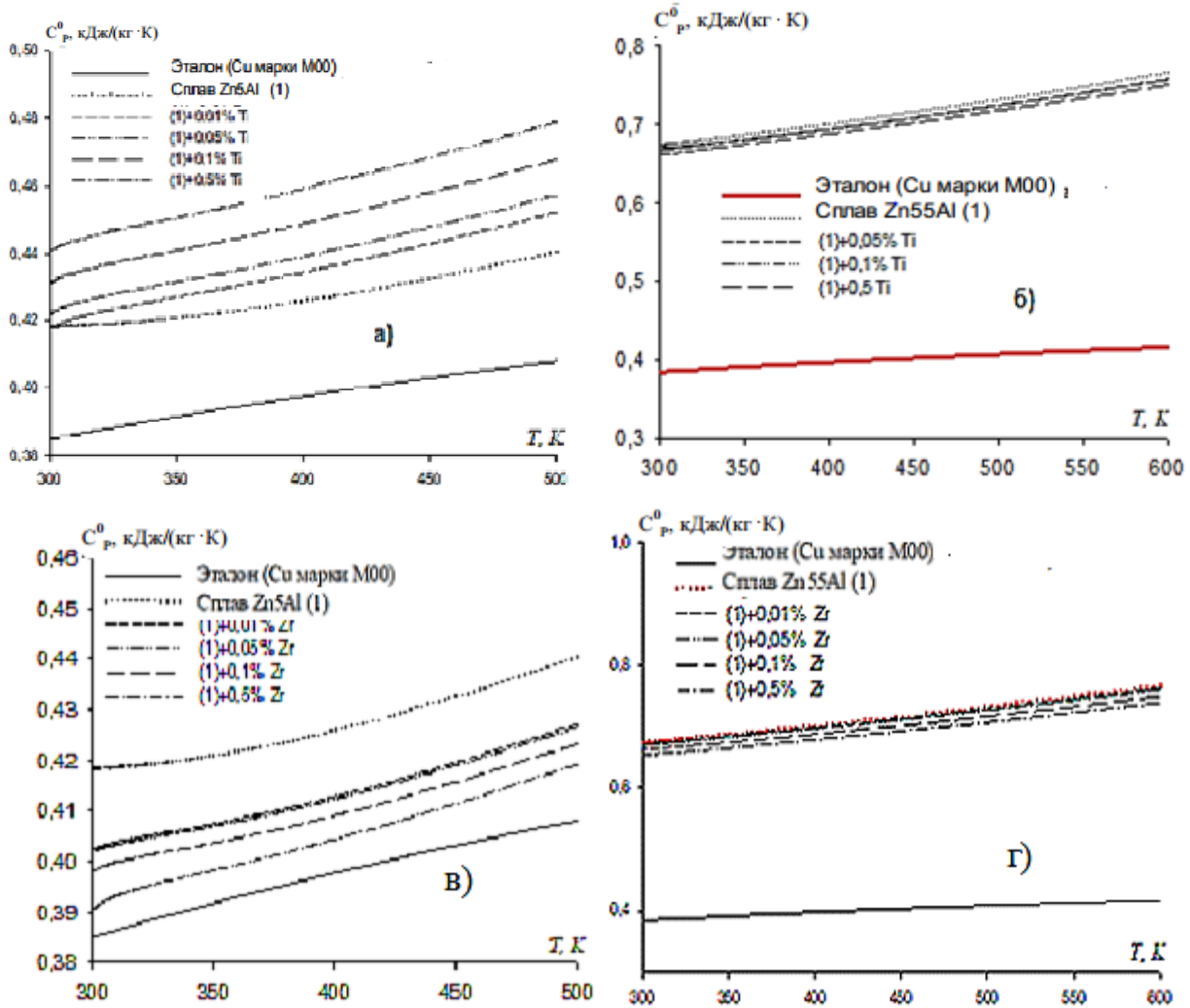
Вычисленные значения  $C_p^0$  для образцов из сплавов Zn5Al и Zn55Al с титаном и цирконием через 50 К представлены на рисунке 2.

**Табл. 4** – Значения коэффициентов  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  уравнения (10) для цинково-алюминиевых сплавов Zn5Al и Zn55Al с цирконием и эталонным образцом (Cu марки М00)

Количество циркония в сплавах, % по массе	$a$ , Дж/(кг·К)	$b \cdot 10^{-4}$ , Дж/(кг·К <sup>2</sup> )	$c \cdot 10^{-7}$ , Дж/(кг·К <sup>3</sup> )	$d \cdot 10^{-10}$ , Дж/(кг·К <sup>4</sup> )	Коэффициент корреляция R <sup>2</sup>
Сплавы Zn5Al	0,4916	-5,90	14,2	-8,90	0.999
0,01	0,4091	-1,35	4,43	-2,01	0.999
0,05	0,4068	-1,24	4,20	-1,87	0.999
0,1	0,3956	-6,52	2,94	$-9,82 \cdot 10^{-11}$	0.999
0,5	0,3395	2,78	-4,22	4,04	0.999
Сплавы Zn55Al	0,6160	1,28	2,35	$-0,522 \cdot 10^{-11}$	0.999
0,01	0,6131	1,27	2,31	$-0,512 \cdot 10^{-11}$	0.999
0,05	0,6114	1,27	2,29	$-0,506 \cdot 10^{-11}$	0.999
0,1	0,6436	-1,21	7,29	-3,94	0.999
0,5	0,6047	8,01	2,98	$-0,996 \cdot 10^{-11}$	0.999
Эталон	0,325	2,75	-2,87	1,42	1.00

С использованием данных по теплоемкости цинково-алюминиевых сплавов Zn5Al, Zn55Al с титаном, цирконием и эталона, и полученных экспериментальных величин скоростей охлаждения, нами была рассчитана коэффициент теплоотдачи  $\alpha$ , (Вт/(К·м<sup>2</sup>)) для сплавов Zn5Al и Zn55Al с титаном, цирконием из эталона по формуле

$$\alpha = \frac{Cm \frac{dT}{dt}}{(T-T_0) \cdot S}, \quad (11)$$



**Рисунок 2.11** – Зависимость удельной теплоемкости от температуры для цинково-алюминиевых сплавов Zn5Al и Zn55Al с титаном (а, б) и цирконием (в, г).

здесь:  $T$  – температура образца,  $T_0$  – температура окружающей среды,  $S$  – площадь поверхности,  $m$  – масса образца.

Температурная зависимость коэффициента нагрева рассчитана по уравнению (11) для цинково-алюминиевых сплавов Zn5Al и Zn55Al с титаном и цирконием, что представлено на рисунке 3.

Изменение температурной зависимости энтальпии, энтропии и энергии Гиббса для цинково-алюминиевых сплавов Zn5Al и Zn55Al с титаном и цирконием рассчитывают по уравнениям (12) - (14) с использованием полиномов (10):

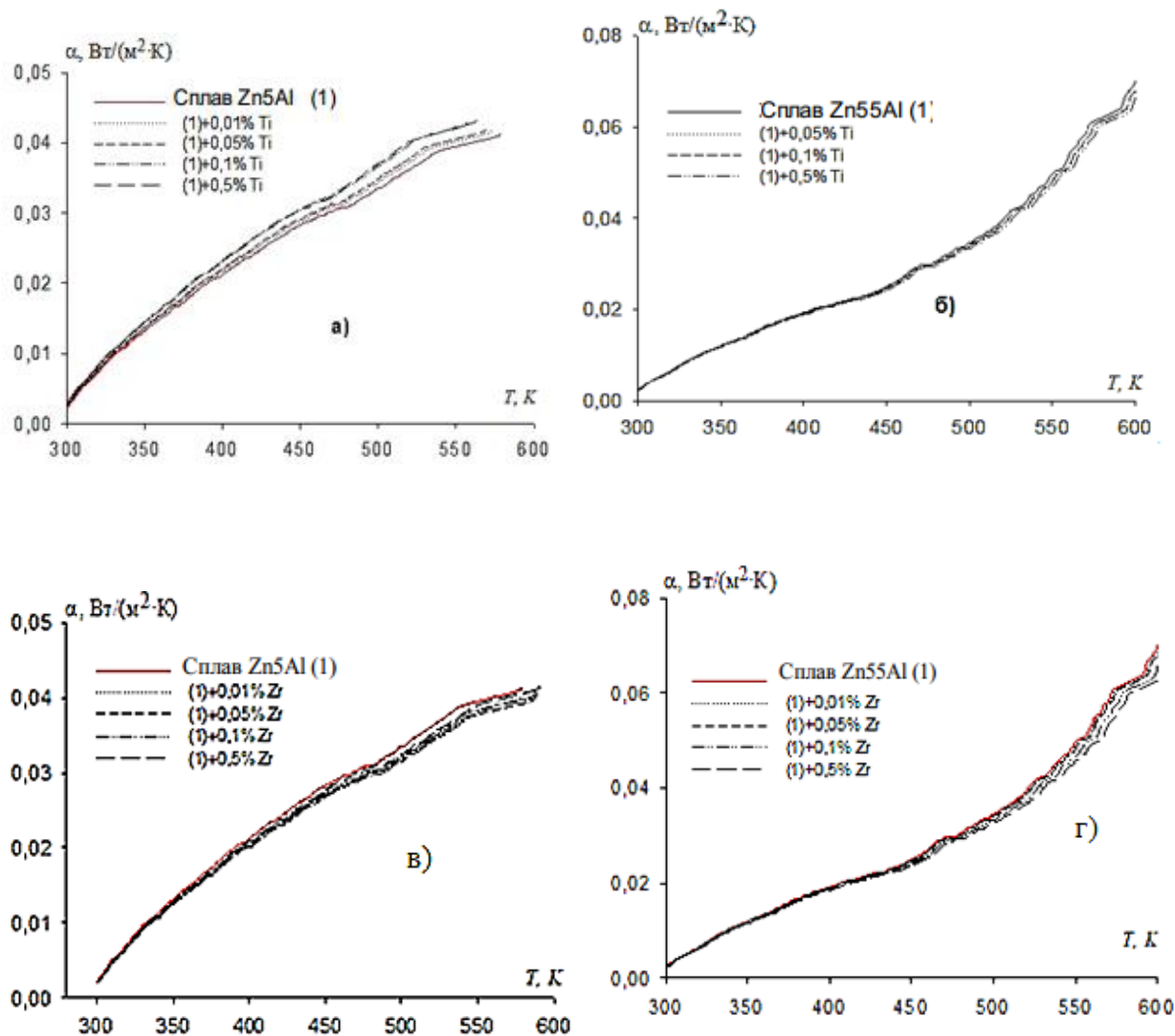
$$[H^\circ(T) - H^\circ(T_0)] = a(T - T_0) + \frac{b}{2}(T^2 - T_0^2) + \frac{c}{3}(T^3 - T_0^3) + \frac{d}{4}(T^4 - T_0^4); \quad (12)$$

$$[S^\circ(T) - S^\circ(T_0)] = a \ln \frac{T}{T_0} + b(T - T_0) + \frac{c}{2}(T^2 - T_0^2) + \frac{d}{3}(T^3 - T_0^3); \quad (13)$$

$$[G^0(T) - G^0(T_0)] = [H^0(T) - H^0(T_0)] - T[S^0(T) - S^0(T_0)], \quad (14)$$

Здесь,  $T_0 = 273,15 \text{ К}$ .

Результаты расчета изменения энтальпии, энтропии и энергии Гиббса для цинково-алюминиевых сплавов Zn5Al и Zn55Al с титаном и цирконием после 50 К представлены в таблицах 5 и 6.



**Рис. 3** – Температурная зависимость коэффициента теплоотдачи цинково-алюминиевых сплавов Zn5Al (а), Zn55Al (б) с титаном (а, б) и цирконием (в, г).

**Табл. 5** – Температурная зависимость изменения термодинамических функций цинково-алюминиевого сплава Zn5Al с титаном и стандартным образцом (Cu марки М00)

Т, К	Эталон	Сплав Zn5Al (1)	(1)+ 0,01% Ti	(1)+ 0,05% Ti	(1)+ 0,1% Ti	(1)+ 0,5% Ti
	$[H^0(T) - H^0(T_0^*)]$ , кДж/кг для сплавов					
300	0,711986	0,773949	0,774362	0,782406	0,79775	0,81653
350	20,13154	21,74397	21,9233	22,15282	22,5875	23,1285
400	39,8675	42,90353	43,4764	43,93482	44,7958	45,8879
450	59,88805	64,35731	65,42621	66,12123	67,4155	69,0899
500	80,16671	86,17662	87,7953	88,73614	90,47296	92,7664
$[S^0(T) - S^0(T_0^*)]$ , кДж/(кг · К) для сплавов						
300	0,002381	0,002588	0,002589	0,002616	0,002667	0,00273
350	0,062238	0,067234	0,067775	0,068485	0,069828	0,07150
400	0,114937	0,123736	0,125324	0,126644	0,129127	0,13226
450	0,162092	0,174266	0,177021	0,178898	0,182401	0,18691
500	0,204819	0,220236	0,224149	0,226544	0,230979	0,23679
$[G^0(T) - G^0(T_0^*)]$ , кДж/кг для сплавов						
300	-0,0022	-0,0024	-0,0024	-0,00242	-0,00247	-0,00253
350	-1,65181	-1,78782	-1,79799	-1,81677	-1,85242	-1,89651
400	-6,10716	-6,59073	-6,65308	-6,72286	-6,85473	-7,01967
450	-13,0534	-14,0623	-14,2331	-14,383	-14,6649	-15,0216
500	-22,2427	-23,9416	-24,2792	-24,5361	-25,0167	-25,6319

**Табл. 6** – Температурная зависимость изменения термодинамических функций цинково-алюминиевого сплава Zn55Al с титаном и стандартным образцом (Cu марки М00)

Т, К	Эталон	Сплав Zn55Al (2)	(2)+ 0,01% Ti	(2)+ 0,05% Ti	(2)+ 0,1% Ti	(2)+ 0,5% Ti
	$[H^0(T) - H^0(T_0^*)]$ , кДж/кг для сплавов					
300	0,711986	1,246724	1,234382	1,301947	1,1402	0,711986
350	20,13154	35,28014	34,92796	36,93318	31,96559	20,13154
400	39,8675	69,99668	69,29176	73,4777	62,76295	39,8675
450	59,88805	105,4404	104,3687	111,0092	93,45109	59,88805
500	80,16671	141,6535	140,1997	149,5859	123,9306	80,16671
550	100,6823	178,676	176,8239	189,2509	154,0838	100,6823

600	121,419	216,5461	214,2786	230,0317	183,7749	121,419
$[S^0(T) - S^0(T_0^*)]$ , кДж/(кг · К) для сплавов						
300	0,002381	0,004169	0,113164	0,004385	0,004095	0,002381
350	0,062238	0,109068	0,209917	0,11509	0,107114	0,062238
400	0,114937	0,201762	0,297529	0,213585	0,198114	0,114937
450	0,162092	0,285238	0,378018	0,302929	0,280033	0,162092
500	0,204819	0,361532	0,452819	0,385177	0,354874	0,204819
550	0,243922	0,432092	0,522988	0,461765	0,424061	0,243922
600	0,280006	0,497984	0,533728	0,533728	0,488642	0,280006
$[G^0(T) - G^0(T_0^*)]$ , кДж/кг для сплавов						
300	-0,0022	-0,00386	-0,05932	-0,0136	-0,08818	-0,0022
350	-1,65181	-2,89365	-4,6796	-3,3482	-5,52431	-1,65181
400	-6,10716	-10,7081	-14,675	-11,9564	-16,4827	-6,10716
450	-13,0534	-22,9167	-29,5194	-25,309	-32,564	-13,0534
500	-22,2427	-39,1125	-48,8095	-43,0026	-53,5064	-22,2427
550	-33,475	-58,9746	-72,2267	-64,7199	-79,1495	-33,475
600	-46,5847	-82,2441	-99,5143	-90,2049	-109,41	-46,5847

Результаты расчета изменения энтальпии, энтропии и энергии Гиббса для цинково-алюминиевых сплавов Zn5Al и Zn55Al с цирконием после 50 К представлены в таблицах 7 и 8.

**Табл. 7** – Температурная зависимость изменения термодинамических функций цинково-алюминиевого сплава Zn5Al с цирконием и стандартным образцом (Cu марки M00)

T, K	Эталон	Сплав Zn5Al (1)	(1)+ 0,01% Zr	(1)+ 0,05%Zr	(1)+ 0,1% Zr	(1)+ 0,5%Zr
$[H^0(T) - H^0(T_0^*)]$ , кДж/кг для сплавов						
300	0,71198	0,773949	0,745499	0,744217	0,739575	0,732016
350	20,1315	21,74397	21,00392	20,96885	20,84628	20,68758
400	39,8675	42,90353	41,51479	41,44609	41,21395	40,97114
450	59,8880	64,35731	62,33234	62,22835	61,88848	61,59062
500	80,1667	86,17662	83,50323	83,36102	82,91206	82,56905
$[S^0(T) - S^0(T_0^*)]$ , кДж/(кг · К) для сплавов						
300	0,00238	0,002588	0,002493	0,002488	0,002473	0,002448
350	0,06223	0,067234	0,064941	0,064832	0,064453	0,063957
400	0,11493	0,123736	0,119709	0,119511	0,118839	0,118115
450	0,16209	0,174266	0,168741	0,168459	0,167533	0,166678
500	0,20481	0,220236	0,213345	0,212984	0,211828	0,210875
$[G^0(T) - G^0(T_0^*)]$ , кДж/кг для сплавов						
300	-0,0022	-0,0024	-0,00231	-0,0023	-0,00229	-0,00226

T, K	Эталон	Сплав Zn5Al (1)	(1)+ 0,01% Zr	(1)+ 0,05%Zr	(1)+ 0,1% Zr	(1)+ 0,5%Zr
350	-1,6518	-1,78782	-1,72538	-1,72248	-1,71219	-1,69729
400	-6,1071	-6,59073	-6,36898	-6,35836	-6,32156	-6,27503
450	-13,053	-14,0623	-13,601	-13,5784	-13,5015	-13,4145
500	-22,242	-23,9416	-23,1695	-23,1308	-23,0018	-22,8684

**Табл. 8** – Температурная зависимость изменения термодинамических функций цинково-алюминиевого сплава Zn55Al с цирконием и стандартным образцом (марка Cu M00)

T, K	Эталон	Сплав Zn55Al (2)	(2)+ 0,01% Zr	(2)+ 0,05% Zr	(2)+ 0,1% Zr	(2)+ 0,5% Zr
$[H^0(T) - H^0(T_0^*)]$ , кДж/кг для сплавов						
300	0,711986	1,246724	1,240194	1,236747	1,224845	1,207396
350	20,13154	35,28014	35,09292	34,99492	34,61595	34,14897
400	39,8675	69,99668	69,62019	69,42471	68,61709	67,72048
450	59,88805	105,4404	104,8654	104,5691	103,2997	101,9684
500	80,16671	141,6535	140,8699	140,4693	138,7204	136,9355
$[S^0(T) - S^0(T_0^*)]$ , кДж/(кг · K) для сплавов						
300	0,002381	0,004169	0,004147	0,004135	0,004095	0,004037
350	0,062238	0,109068	0,108489	0,108186	0,107018	0,105572
400	0,114937	0,201762	0,200678	0,200115	0,197803	0,19521
450	0,162092	0,285238	0,283687	0,282886	0,279487	0,27587
500	0,204819	0,361532	0,359541	0,358521	0,354112	0,34954
$[G^0(T) - G^0(T_0^*)]$ , кДж/кг для сплавов						
300	-0,0022	-0,00386	-0,00384	-0,00383	-0,00379	-0,00374
350	-1,65181	-2,89365	-2,87836	-2,87034	-2,8404	-2,8014
400	-6,10716	-10,7081	-10,6511	-10,6213	-10,5042	-10,3635
450	-13,0534	-22,9167	-22,7937	-22,7297	-22,4696	-22,1733
500	-22,2427	-39,1125	-38,9008	-38,7913	-38,3356	-37,8344

Увеличение термического расширения, термического коэффициента, энтальпии и энтропии сплавов зависит от количества титана и циркония с эффектом изменения композиционной структуры цинково-алюминиевых сплавов, что связано с изменением внутренней структуры цинково-алюминиевых сплавов. сплавов Zn5Al и Zn55Al, то есть с увеличением степени неоднородности тройных сплавов.

### **Глава III. КИНЕТИКА ПРОЦЕССА ОКИСЛЕНИЯ ЦИНКОВО-АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ Zn5Al И Zn55Al С ТИТАНОМ И ЦИРКОНИЕМ В ТВЕРДОМ СОСТОЯНИИ**

В этой главе исследуется влияние температуры и химического состава на кинетику окисления цинково-алюминиевых сплавов Zn5Al и Zn55Al с титаном и цирконием в твердом состоянии.

Для решения поставленной задачи мы использовали термогравиметрический метод с последовательным анализом образцов. Изменение веса сплавов регистрировали согласно растяжению пружины с помощью катетометра КМ-8. Тиглы (диаметром 18-20 мм, высотой 25-26 мм) перед опытом нагревали при температуре 1000-1200°C до постоянной массы в окислительной среде.

В качестве примера ниже приведены результаты исследования кинетики окисления цинково-алюминиевых сплавов Zn5Al и Zn55Al с титаном в сплавах с 0,01; 0,05; 0,1; 0,5% веса добавки. Кинетические и энергетические параметры процесса окисления сплавов алюминия Zn5Al и Zn55Al с титаном представлены в табл. 9.

Кинетические кривые алюминиево-цинкового сплава Zn5Al, легированного титаном, описывают усиленный процесс образования оксидной пленки по сравнению с исходным сплавом Zn5Al. Такой тип механизма окисления объясняется появлением на поверхности сплавов оксидов сложного порядка, характеризующихся высокими защитными свойствами.

Динамика увеличения относительной массы образцов в зависимости от времени и температуры для цинково-алюминиевого сплава Zn5Al, легированного титаном, показала, что скорость окисления увеличивается с повышением температуры (таблица 9). Легирование Zn5Al титаном увеличивает потенциальную энергию активации окисления сплавов. Также установлено, что при тех же температурах для цинково-алюминиевого сплава Zn5Al с добавкой 0,01; 0,05; 0,1 и 0,5 % по массе титана истинная скорость окисления ниже, чем у исходного сплава Zn5Al.

Истинная скорость окисления цинково-алюминиевого сплава Zn5Al изменяется в зависимости от температуры в пределах от  $2,10 \cdot 10^{-4}$  до  $3,62 \cdot 10^{-4}$  кг·м<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup> соответственно при температурах 523К и 623К. Потенциальная энергия активации процесса окисления, прямо зависящая от тангенса угла наклона  $\lg K - 1/T$  для этого сплава, составляет 128,84 кДж/моль (табл. 9).

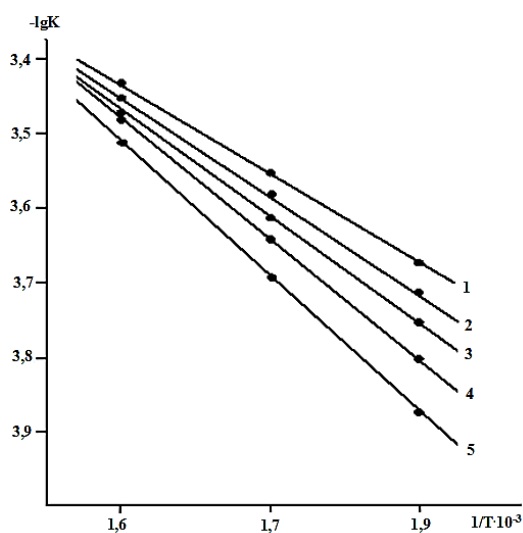
Истинная степень окисления цинково-алюминиевого сплава Zn5Al с 0,5 мас. % титанового сплава изменяется в зависимости от температуры в пределах от  $1,34 \cdot 10^{-4}$  до  $3,08 \cdot 10^{-4}$  кг·м<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup> соответственно при температурах 523К и 623К. Потенциальная энергия активации процесса окисления, непосредственно связанная с тангенсом угла наклона  $\lg K - 1/T$ , для этого сплава равна 179,90 кДж/моль.

Логарифмическая зависимость для цинково-алюминиевого сплава Zn5Al (1), которая равна 0,01 (2); 0,05 (3); 0,1 (4); 0,5 (5) % по весу титана представлена на рисунке 4 и содержит рекомендацию по прямой линии. По результатам исследований кинетики окисления сплавов построены изохроны окисления цинково-алюминиевого сплава Zn5Al с титаном. Кривые характеризуются монотонным снижением скорости окисления, повышением температуры и количества титана как при выдержке сплавов в окислительной атмосфере до 10 мин (кривая 1), так и при выдержке в окислительной атмосфере до 20 минут (кривая 2), что увеличивает значение активной потенциальной энергии с увеличением содержания титана (рис. 5).

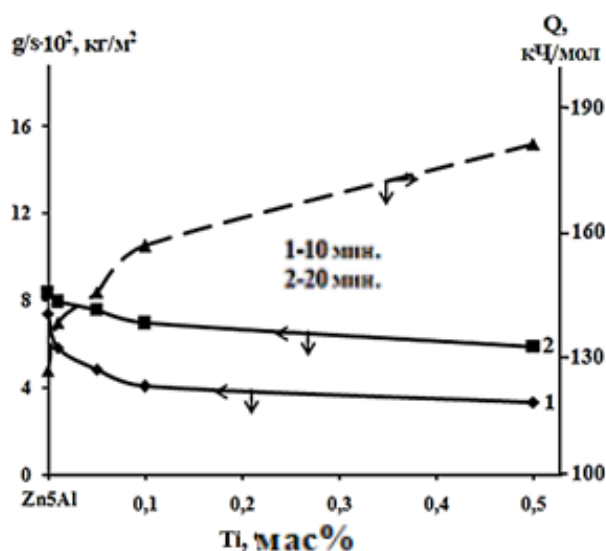


**Табл. 9** – Кинетические и энергетические параметры процесса окисления цинково-алюминиевых сплавов Zn5Al и Zn55Al с титаном в твердом состоянии

Количество титана в сплавах, % по массе	Температура окисления, К	Истинная скорость окисления $K \cdot 10^4$ , $\text{кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	Энергия активации потенциала окисления, кДж/мол
Сплав Zn5Al	523К	2,10	128,84
	573К	2,71	
	623К	3,62	
0,01	523К	1,91	137,84
	573К	2,56	
	623К	3,53	
0,05	523К	1,77	144,06
	573К	2,44	
	623К	3,38	
0,1	523К	1,58	158,12
	573К	2,27	
	623К	3,26	
0,5	523К	1,34	179,90
	573К	2,03	
	623К	3,08	
Сплав Zn55Al	523К	2,13	154,51
	573К	2,81	
	623К	3,73	
0,01	523К	1,86	165,16
	573К	2,58	
	623К	3,62	
0,05	523К	1,72	174,18
	573К	2,43	
	623К	3,54	
0,1	523К	1,51	192,56
	573К	2,22	
	623К	3,37	
0,5	523К	1,28	203,82
	573К	2,02	
	623К	3,20	

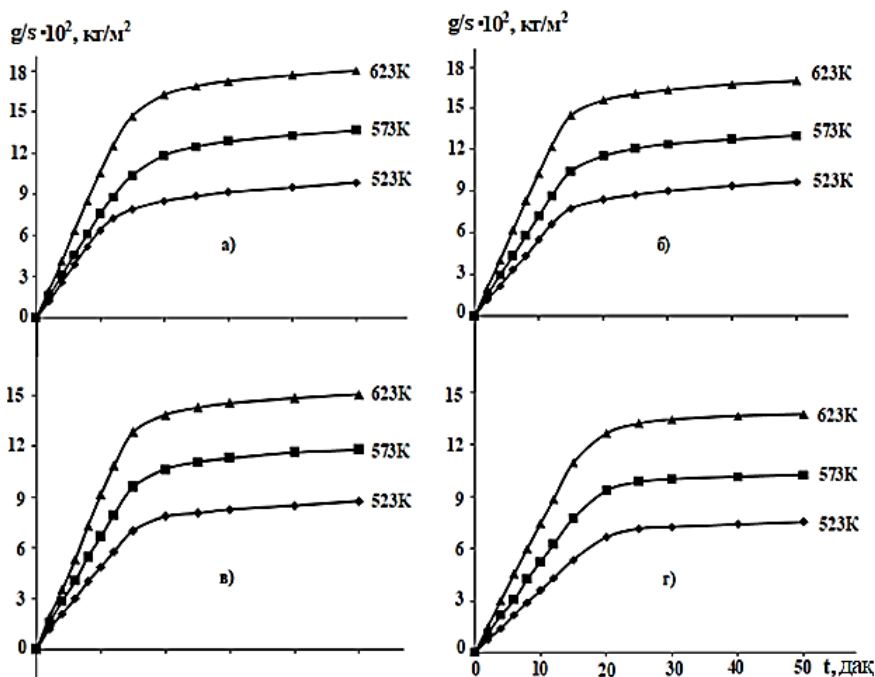


**Рис. 4.-** Зависимость  $\lg K$  от  $1/T$  для цинково-алюминиевых сплавов Zn5Al (1) с титаном, мас. %: 0,01(2); 0,05(3); 0,1(4); 0,5(5)



**Рис.5 –** Изохроны окисления Zn5Al цинково-алюминиевый сплав с титаном, при температуре 523К

Квадратично-кинетическое окисление и их алгоритмы для сплава Zn5Al с титаном (0,01...0,1% по массе) в координатах  $(g/s)^2-t$  представлены на рис. 6. На рис. 6 показано, что окисление сплавов имеет гиперболический механизм. Исследования проводились при температурах 523К, 573К и 623К.



**Рис. 6.** Квадратичные кинетические кривые окисления цинково-алюминиевого сплава Zn5Al (а) с титаном, мас. %: 0,01 (б); 0,05 (в); 0,1 (г), в твердом состоянии

**Табл. 10** – Результаты математической обработки кривых кинетики окисления цинково-алюминиевых сплавов Zn5Al и Zn55Al с титаном в твердом состоянии

Количество Ti в сплаве, % по массе	Температура окисления, К	Квадратичные полиномы кривых кинетики окисления сплавов	Коэффициент регрессии R
Сплав Zn5Al	523К	$y = -0,5 \cdot 10^{-1}x^5 - 0,014x^3 + 0,126x^2 + 0,415x$	0,997
	573К	$y = -0,5 \cdot 10^{-1}x^5 - 0,015x^3 + 0,156x^2 + 0,422x$	0,999
	623К	$y = -0,6 \cdot 10^{-5}x^5 - 0,009x^3 + 0,105x^2 + 0,721x$	0,999
0,1	523К	$y = -0,6 \cdot 10^{-1}x^5 - 0,5 \cdot 10^{-5}x^4 - 0,002x^3 + 0,027x^2 + 0,296x$	0,999
	573К	$y = -0,6 \cdot 10^{-4}x^5 - 0,5 \cdot 10^{-4}x^4 - 0,001x^3 + 0,024x^2 + 0,441x$	0,998
	623К	$y = -0,6 \cdot 10^{-1}x^5 - 0,4 \cdot 10^{-1}x^4 - 0,004x^3 + 0,049x^2 + 0,576x$	0,999
0,5	523К	$y = -0,6 \cdot 10^{-1}x^5 - 0,5 \cdot 10^{-2}x^4 - 0,001x^3 + 0,016x^2 + 0,265x$	0,999
	573К	$y = -0,6 \cdot 10^{-3}x^5 - 0,5 \cdot 10^{-3}x^4 - 0,001x^3 + 0,021x^2 + 0,365x$	0,998
	623К	$y = -0,6 \cdot 10^{-2}x^5 - 0,5 \cdot 10^{-7}x^4 - 0,002x^3 + 0,028x^2 + 0,590x$	0,999
Сплав Zn55Al	523К	$y = -0,6 \cdot 10^{-6}x^5 - 0,5 \cdot 10^{-6}x^4 - 0,002x^3 + 0,010x^2 + 0,660x$	0,997
	573К	$y = -0,7 \cdot 10^{-9}x^5 - 0,5 \cdot 10^{-8}x^4 - 0,003x^3 + 0,029x^2 + 0,688x$	0,999
	623К	$y = -0,6 \cdot 10^{-4}x^5 - 0,8 \cdot 10^{-2}x^3 + 0,095x^2 + 0,756x$	0,999
0,1	523К	$y = -0,6 \cdot 10^{-3}x^5 - 0,5 \cdot 10^{-3}x^4 - 0,001x^3 + 0,019x^2 + 0,281x$	0,999
	573К	$y = -0,6 \cdot 10^{-3}x^5 - 0,5 \cdot 10^{-5}x^4 - 0,002x^3 + 0,030x^2 + 0,409x$	0,999
	623К	$y = -0,6 \cdot 10^{-2}x^5 - 0,5 \cdot 10^{-8}x^4 - 0,003x^3 + 0,043x^2 + 0,595x$	0,999
0,5	523К	$y = -0,6 \cdot 10^{-4}x^5 - 0,6 \cdot 10^{-3}x^4 + 0,004x^2 + 0,280x$	0,998
	573К	$y = -0,6 \cdot 10^{-4}x^5 - 0,5 \cdot 10^{-3}x^4 - 0,001x^3 + 0,022x^2 + 0,343x$	0,998
	623К	$y = -0,6 \cdot 10^{-2}x^5 - 0,5 \cdot 10^{-9}x^4 - 0,003x^3 + 0,047x^2 + 0,490x$	0,999

В целом было показано, что скорость окисления увеличивается со временем на ранних стадиях процесса. Оксидированные пленки из ZnO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Ti<sub>2</sub>O<sub>3</sub> на первых стадиях обладают низкими защитными свойствами, процесс окисления заканчивается увеличением толщины оксидной пленки. Добавка цинково-алюминиевых сплавов Zn5Al и Zn55Al титаном в пределах 0,01...0,5% по массе снижает скорость их окисления, что заканчивается увеличением потенциальной энергии активации процесса окисления.

Таким же образом изучена кинетика окисления цинково-алюминиевых сплавов Zn5Al и Zn55Al цирконием при количествах: 0,01; 0,05; 0,1; 0,5% от массы. В табл. 11 представлена зависимость потенциальной энергии активации процесса окисления Zn5Al и Zn55Al, легированных титаном и цирконием.

Данные, представленные в таблице, показывают, что значение потенциальной энергии активации сплавов увеличивается от титана к цирконию. Процесс взаимодействия компонентов окисления со сплавом

завершается через 25-30 минут от начала процесса окисления. Из нелинейной зависимости квадратичных кинетических кривых  $(g/s)^2-t$  окисления цинково-алюминиевых сплавов Zn5Al и Zn55Al, легированных титаном и цирконием, можно сделать вывод, что они не лежат на прямых линиях. Поэтому можно предположить, что процесс окисления сплавов протекает по гиперболическому закону. Это подтверждается результатами обработки квадратичных кривых окисления сплава (табл. 10).

В целом исследования кинетики окисления цинково-алюминиевых сплавов Zn5Al и Zn55Al титаном и цирконием показывают, что добавки титана и циркония в исследованных диапазонах количеств (0,01...0,5 % по массе) увеличивает окисление первичных сплавов. Снижение скорости окисления во всех случаях сопровождается соответствующим увеличением потенциальной энергии активации.

**Табл. 11** – Зависимость потенциальной энергии активации процесса окисления цинково-алюминиевых сплавов Zn5Al и Zn55Al от количества титана и циркония в твердом состоянии

Температура окисления, К	Легирующие компоненты сплавов Zn5Al и Zn55Al	Потенциальная энергия активации, кДж/мол				
		Количество добавок в сплаве, % по массе				
		-	0,01	0,05	0,1	0,5
523К	Zn5Al	128,84	-	-	-	-
573К	Ti		137,84	144,06	158,12	179,90
623К	Zr		135,88	147,38	164,22	187,84
523К	Zn55Al	154,51	-	-	-	-
573К	Ti		165,16	174,18	192,56	203,82
623К	Zr		160,06	171,07	190,64	208,26

Таким образом, существует прямая связь между окислением и физико-химическими свойствами элементов восьмой группы периодической системы.

### **Влияние титана и циркония на твердость цинково-алюминиевых сплавов Zn5Al, Zn55Al**

Одной из важнейших характеристик после стабильности является твердость материала. Испытание на твердость считается неразрушающим методом контроля. Имеется достаточно достоверных данных о связи значений твердости с пределами текучести, стабильностью, а это, в свою очередь, позволяет отказаться от подготовки специальных образцов для механических испытаний и заменить их относительно простыми методами определения твердости.

**Табл. 12**–Твердость цинково-алюминиевых сплавов Zn5Al, Zn55Al с титаном и цирконием.

Количество титана и циркония в сплавах, % по массе	Диаметр отпечатка d, мм	твердость НВ, МПа	Предел прочности $\sigma_B$ , МПа
Zn5Al (1)	2,8	454	136,2
(1) + 0,1% Ti	1,8	956	286,8
(1) + 0,5% Ti	1,6	1211	363,3
(1) + 0,1% Zr	2,1	700	210,0
(1) + 0,5% Zr	2	772	231,6
Zn55Al (2)	2,7	392	98,00
(2) + 0,1% Ti	2,1	700	175,0
(2) + 0,5% Ti	2	772	193,0
(2) + 0,1% Zr	2,8	582	145,5
(2) + 0,5% Zr	2,1	637	159,2

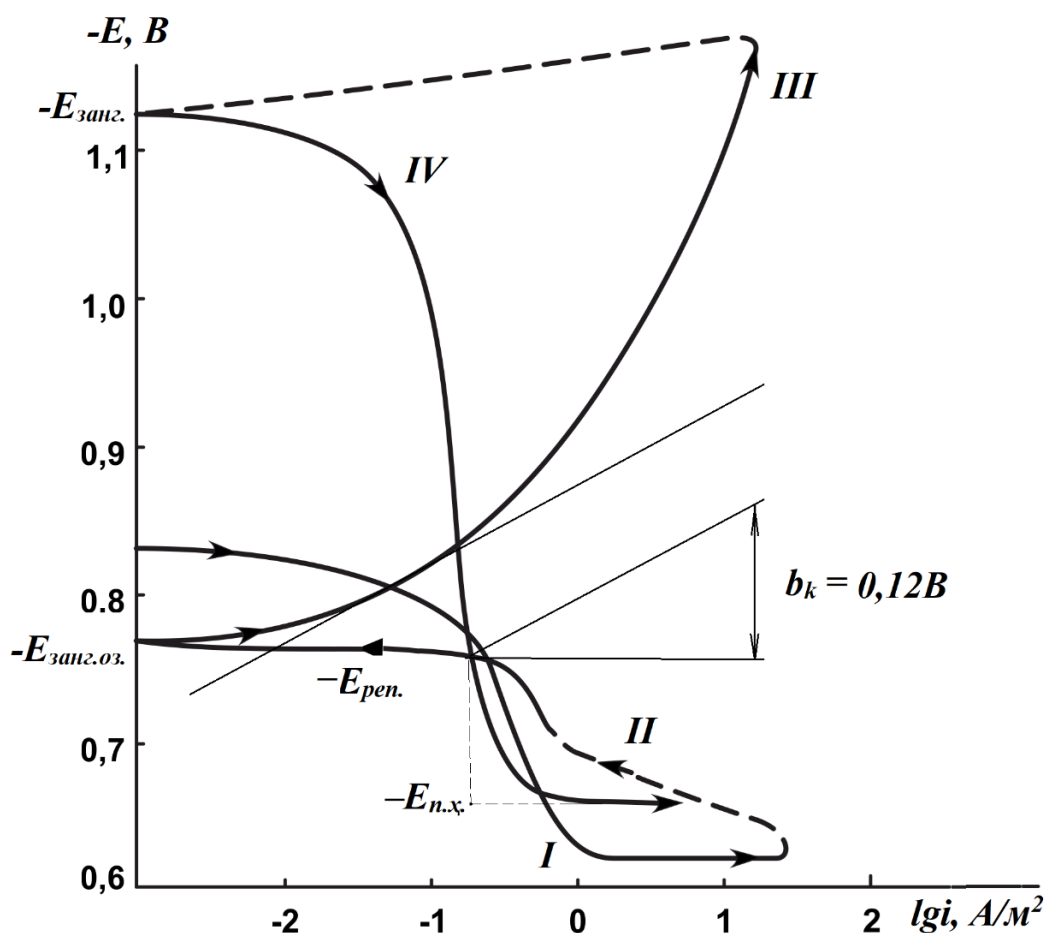
Исследование твердости цинково-алюминиевых сплавов Zn5Al и Zn55Al (Гальфан I и Гальфан II), легированных титаном и цирконием и не подвергавшихся температурной обработке, проведено методом Бринелля. Исследования проводились на приборе марки ТШ-2. В испытания включались образцы толщиной не более 6 мм и диаметром 16 мм. Результаты испытаний представлены в таблице 12.

Наблюдения таблицы показывают, что добавка титана и циркония в состав цинково-алюминиевых сплавов до 0,5 % по массе повышает твердость первичных сплавов. В целом добавки титана и циркония в состав сплавов Zn5Al и Zn55Al повышают их твердость, что обусловлено образованием интерметаллических соединений.

#### **Глава IV. ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРОЗИОННО-ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ ЦИНКОВО-АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ Zn5Al, Zn55Al С ТИТАНОМ И ЦИРКОНИЕМ**

Исследование коррозионно-электрохимического поведения цинково-алюминиевых сплавов Zn5Al и Zn55Al, легированных цирконием, проведена на образцах в растворе хлорида натрия с концентрацией 0,03 и 3,0 % с использованием потенциостата ПИ-50.1.1 с программатором ПР-8 и самопишущим прибором - ЛКД-4. Температуру раствора в ячейке поддерживали на уровне 20°C с помощью термостата МЛШ-8. В качестве электрода сравнения использовали хлорид серебра, а в качестве вспомогательного – платину. Перед погружением образца в рабочий раствор его кончик протирали бумажной салфеткой, очищали от масел, подкисляли в 10% растворе NaOH, тщательно промывали спиртом, а затем погружали в раствор электролита NaCl для исследований. Исследования проводились в потенциодинамическом режиме при скорости раскрытия потенциала 2 мВ·с<sup>-1</sup>.

Электроды поляризовали анодной потенциодинамикой от заданного значения стационарного потенциала до резкого увеличения тока (до постоянного значения тока 2А), затем в обратном направлении до значения потенциала  $-1,1 \div -1,2$ В и в этом случае окисная пленка восстанавливается. Затем образцы снова поляризовали в положительном направлении к потенциалу питтинга. Из потенциодинамических кривых были определены электрохимические рекомендации основных сплавов: коррозионный потенциал  $E_{кор.}$  и ток коррозии  $i_{кор.}$ , потенциал питтингообразования  $E_{п.х}$  и репассивация  $E_{реп.}$  (рис. 7).



**Рисунок 7** – Полная потенциодинамическая поляризационная кривая ( $2 \text{ мВ} \cdot \text{с}^{-1}$ ) цинково-алюминиевый сплав Zn5Al с 0,01% по массе циркония, в среде электролита 3,0% NaCl

Графически величина  $E_{реп.}$  определяется как потенциал, при котором происходит первое сокращение в направлении, противоположном анодной кривой, или как потенциал, при котором происходит пересечение прямого и противоположного направления анодной поляризационной кривой. Скорость коррозии определяли по выражению  $K = i_{кор.} \cdot k$ , где  $k$  — электрохимический эквивалент, его численное значение для цинка равно  $1,22 \text{ г} \cdot \text{А}^{-1} \cdot \text{ч}^{-1}$ . Измерение электрохимического потенциала составляло  $\pm 5 \div \pm 10 \text{ мВ}$ , плотность тока коррозии составляла  $(0,1-0,5) \cdot 10^{-4} \text{ А} \cdot \text{м}^{-2}$ .

Химический состав и результаты исследования анодного поведения сплавов цинка с алюминием Zn5Al и Zn55Al, легированных цирконием, представлены в таблицах 13, 14 и на рисунках 7-8. В первые минуты после погружения образца в раствор изменение потенциала резко пошло в положительную сторону (таблица 13), при этом по мере увеличения концентрации хлорид-ион в растворе электролита потенциал  $E_{св.кор.}$  снижается, что свидетельствует об ухудшении коррозионной стойкости сплавов в среде электролита NaCl. Если сравнить потенциал цинково-алюминиевого сплава Zn5Al и Zn55Al, легированного цирконием, то можно отметить, что положительная величина потенциала относительно высока для цинково-алюминиевого сплава Zn5Al в среде 0,03% электролита NaCl. Относительно отрицательная величина этого потенциала относится к цинково-алюминиевому сплаву Zn55Al, в среде 3,0% электролита NaCl (таблица 13).

**Табл. 13** – Зависимость потенциала свободной коррозии ( $-E_{св.кор.}$ , В) цинково-алюминиевых сплавов Zn5Al и Zn55Al с цирконием с течением времени, в электролитной среде NaCl

Среда NaCl, % по массе	Количество циркония в сплавах, % по весу	Время удерживания, мин.							
		0,3	0,6	2	4	10	20	40	60
0,03	Zn5Al	1,087	1,078	1,073	1,064	1,058	1,055	1,052	1,050
	0,01	0,672	0,657	0,650	0,630	0,614	0,606	0,584	0,584
	0,05	0,667	0,648	0,640	0,624	0,609	0,600	0,582	0,582
	0,1	0,651	0,638	0,632	0,616	0,602	0,590	0,570	0,570
	0,5	0,640	0,627	0,620	0,608	0,584	0,576	0,546	0,546
	Zn55Al	0,990	0,988	0,985	0,979	0,975	0,974	0,972	0,970
	0,01	0,754	0,744	0,740	0,726	0,702	0,688	0,660	0,650
	0,05	0,712	0,678	0,666	0,647	0,632	0,618	0,584	0,560
	0,1	0,702	0,672	0,662	0,639	0,614	0,595	0,546	0,525
	0,5	0,692	0,668	0,660	0,636	0,610	0,590	0,544	0,520
3,0	Zn5Al	1,140	1,132	1,116	1,109	1,107	1,104	1,100	1,153
	0,01	0,867	0,857	0,834	0,812	0,797	0,774	0,744	0,892
	0,05	0,862	0,850	0,824	0,796	0,780	0,750	0,740	0,887
	0,1	0,840	0,838	0,816	0,782	0,767	0,744	0,724	0,872
	0,5	0,806	0,786	0,764	0,740	0,728	0,694	0,660	0,846
	Zn55Al	1,038	1,032	1,029	1,026	1,024	1,023	1,021	1,020
	0,01	1,185	1,170	1,165	1,138	1,090	1,076	1,040	1,030
	0,05	1,174	1,152	1,142	1,124	1,080	1,066	1,020	0,980
	0,1	1,147	1,126	1,114	1,090	1,067	1,045	1,004	0,960
	0,5	1,135	1,108	1,092	1,067	1,040	1,021	0,984	0,950

Независимо от химического состава для всех исследованных сплавов зарегистрирован сдвиг потенциала в положительную область, что сопровождается образованием защитной оксидной пленки, которое завершается через 35-45 мин после первоначального погружения образцов. в электролит и

зависит от химического состава сплавов. Так, через 1 час выдержки электрода в электролите, представляющем собой 0,03 % раствор хлорида натрия, потенциал свободной коррозии сплава Zn55Al составляет -0,880 В, для сплава с 0,5 % массы циркония -0,520 В. Свободный коррозионный потенциал цинково-алюминиевого сплава Zn55Al после 1 часа хранения в 3,0 % растворе хлорида натрия составляет -1,022 В, для сплава, легированного 0,5 % по массе циркония, равен -0,950 В (табл. 14).

Основные коррозионно-электрохимические рекомендации сплавов Zn5Al и Zn55Al, легированных цирконием (табл. 14), свидетельствуют о том, что добавка циркония в небольших количествах (0,01...0,5 % по массе) повышает потенциал свободной коррозии и питтинговой коррозии сплавов переходит в положительную область. В диапазоне 0,01...0,5 % по массе легирования цирконием первичных цинково-алюминиевых сплавов Zn5Al и Zn55Al скорость коррозии сплавов в исследуемых средах электролита NaCl снижается до 15-20 %.

**Табл. 14** – Коррозионно-электрохимические характеристики сплавов Zn5Al и Zn55Al с цирконием в среде электролита NaCl

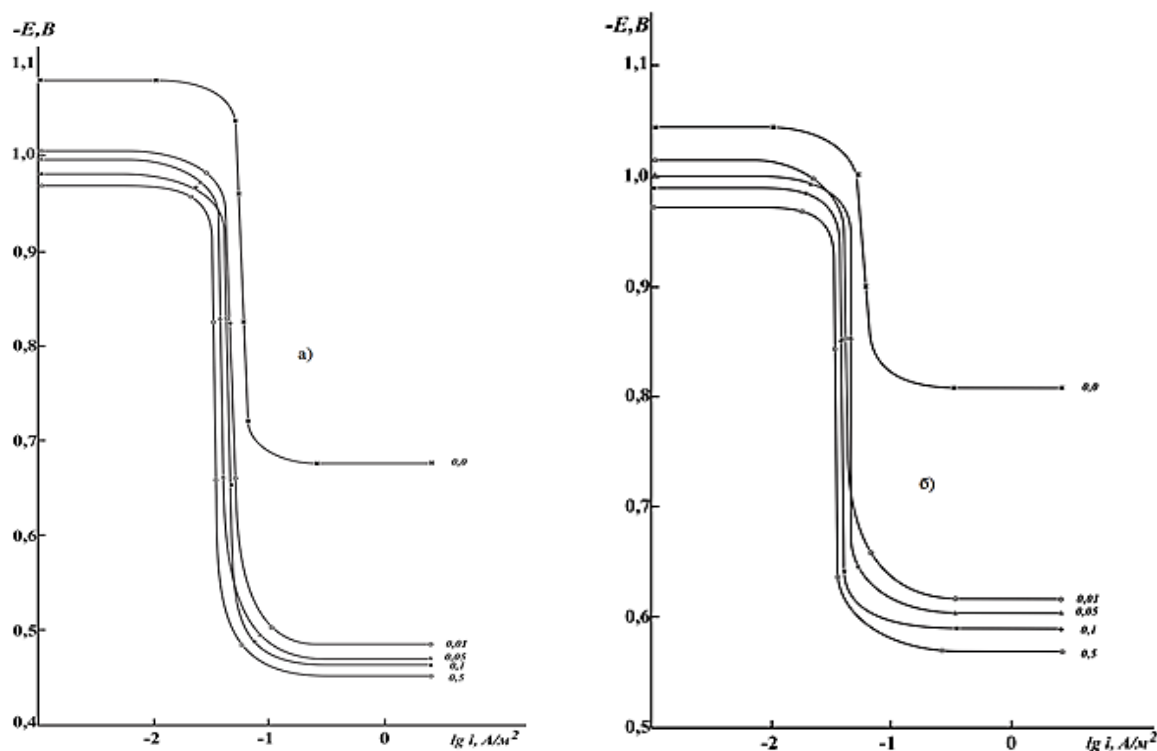
среда NaCl, % по весу	Количество циркония в сплавах, % по весу	Электрохимические потенциалы, В (э.х.п.)				Скорость коррозии	
		$-E_{\text{св.кор.}}$	$-E_{\text{кор.}}$	$-E_{\text{п.х.}}$	$-E_{\text{реп.}}$	$i_{\text{кор.}}, 10^2, \text{А}\cdot\text{м}^2$	$K\cdot 10^3, \text{г}\cdot\text{м}^2\cdot\text{ч}^{-1}$
0,03	Zn5Al	0,940	1,080	0,676	0,800	0,101	1,23
	0,01	0,565	1,005	0,485	0,540	0,022	0,26
	0,05	0,560	0,996	0,470	0,530	0,016	0,19
	0,1	0,540	0,980	0,465	0,520	0,012	0,14
	0,5	0,528	0,968	0,455	0,520	0,009	0,10
	Zn55Al	0,880	1,010	0,664	0,860	0,030	0,233
	0,01	0,570	0,980	0,470	0,530	0,024	0,187
	0,05	0,560	0,965	0,460	0,515	0,022	0,171
	0,1	0,525	0,950	0,450	0,500	0,020	0,156
	0,5	0,520	0,936	0,435	0,500	0,018	0,140
3,0	Zn5Al	1,064	1,180	0,700	0,900	0,110	1,34
	0,01	0,744	1,113	0,540	0,710	0,032	0,39
	0,05	0,740	1,110	0,530	0,705	0,027	0,33
	0,1	0,724	1,100	0,525	0,700	0,023	0,28
	0,5	0,660	1,060	0,520	0,690	0,018	0,22
	Zn55Al	1,022	1,044	0,810	0,924	0,038	0,296
	0,01	1,010	1,014	0,618	0,900	0,032	0,249
	0,05	0,980	1,000	0,605	0,890	0,029	0,226
	0,1	0,960	0,990	0,590	0,880	0,026	0,202
	0,5	0,950	0,976	0,570	0,880	0,025	0,195

На рис. 8 представлены анодные ветви потенциодинамических поляризационных кривых сплавов Zn5Al и Zn55Al с цирконием. Кривые 2–5, относящиеся к сплавам, легированных цирконием (0,01–0,5 % по массе),



характеризуются положительными величинами потенциалов коррозии и питтинга по сравнению с кривой 1 для исходных цинково-алюминиевых сплавов Zn5Al и Zn55Al. Это свидетельствует об относительно низкой скорости анодной коррозии металлизированных сплавов.

Добавки циркония изменяют состав исходного алюминиевого сплава Zn55Al, уменьшая размеры зерен фаз твердого раствора алюминия ( $\alpha$ -Al) и алюминия в цинк ( $\gamma$ -Zn) (рис. 9). С увеличением количества циркония также наблюдается сфероидизация составляющих указанных фаз. Мельчайшие добавки циркония выполняют задачу изменения структуры композиционного материала и делают часть композиционной структуры первичных цинково-алюминиевых сплавов Zn5Al и Zn55Al сферической и мелкой (рис. 9 в, г, д, е), что приводит к улучшению в их коррозионной стойкости. Большие добавки циркония (0,5 % по массе) считаются нежелательными, так как они упрочняют композиционную структуру первичных сплавов Zn5Al и Zn55Al, в результате чего интерметаллические фазы неизвестного состава образуют игольчатую форму изолированных крупных кристаллов из расплава (рис. 9 ё, ж).

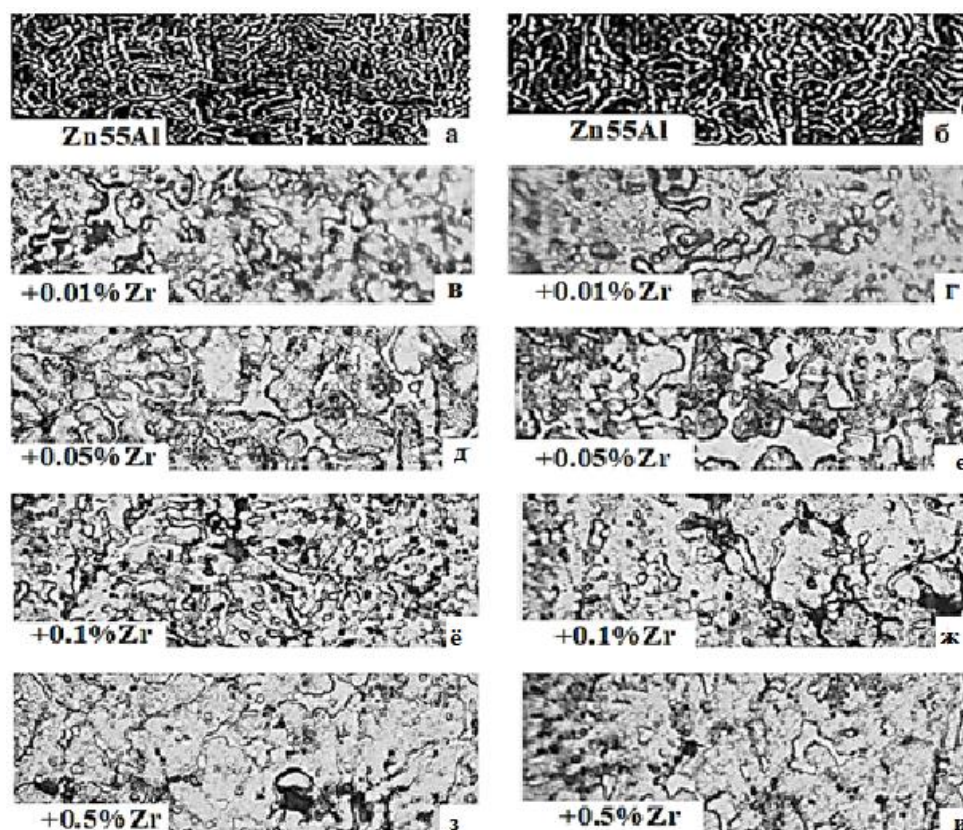


**Рис. 8** – Потенциодинамические поляризационные ( $2 \text{ мВ} \cdot \text{с}^{-1}$ ) кривые сплавов Zn5Al (а) и Zn55Al (б), содержащих цирконий: 0,01(2), 0,05(3), 0,1(4), 0,5(5) (% по массе), в среде электролита 3,0% NaCl (б)

Таким же образом в потенциодинамическом режиме изучено анодное поведение цинково-алюминиевых сплавов Zn5Al и Zn55Al, легированных 0,01-0,5% по массе титана в 0,03 и 3,0% электролите NaCl потенциостатическим методом в режиме потенциодинамический. В табл. 15 представлена

сравнительная зависимость скорости коррозии сплавов Zn5Al и Zn55Al от количества титана и циркония в среде электролита NaCl.

Оказалось, что для первичных алюминиевых сплавов Zn5Al и Zn55Al скорость коррозии в среде электролита NaCl снижается при увеличении концентрации титана и циркония. Скорость электрохимической коррозии первичных сплавов и сплавов, обогащенных титаном и цирконием, возрастает с увеличением доли хлорид-ионов в растворе электролита NaCl (табл. 15).



**Рис. 9** – Структура сплавов Zn55Al-алюминий с цирконием при увеличении 50 раз (а, в, г, ё, з) и 100 раз (б, г, е ж, и). Количество циркония в сплаве (% по массе) показано на рисунках.

**Табл. 15** – Сравнительная зависимость скорости коррозии ( $K \cdot 10^3$  г/м<sup>2</sup>·ч) цинково-алюминиевых сплавов Zn5Al и Zn55Al от количества титана и циркония, в электролитной среде NaCl

Сплав и его лигирующий компонент	0,03% NaCl					3,0% NaCl				
	Количество добавок в сплаве, % по массе									
	–	0,01	0,05	0,1	0,5	–	0,01	0,05	0,1	0,5
Zn5Al	1,23	–	–	–	–	1,34	–	–	–	–
Ti		0,34	0,30	0,25	0,20		0,47	0,41	0,36	0,31
Zr		0,26	0,19	0,14	0,10		0,39	0,33	0,28	0,22
Zn55Al	0,233	–	–	–	–	0,296	–	–	–	–
Ti		0,218	0,202	0,187	0,171		0,265	0,257	0,249	0,241
Zr		0,187	0,171	0,156	0,140		0,249	0,226	0,202	0,195

## ЗАКЛЮЧЕНИЯ

### I. Основные результаты и выводы

1. В режиме «охлаждение» исследованы теплофизические свойства цинково-алюминиевых сплавов Zn5Al и Zn55Al с титаном и цирконием. По значениям их удельной теплоёмкости рассчитаны термодинамические функции (энтальпия, энтропия и энергия Гиббса) цинково-алюминиевых сплавов Zn5Al и Zn55Al с добавками титана и циркония. При увеличении количества добавок (Ti, Zr) в составе исходных сплавов Zn5Al и Zn55Al, а также повышении температуры показано, что относительная теплоёмкость, термический коэффициент, энтальпия и энтропия цинково-алюминиевых сплавов увеличиваются, а значение энергии Гиббса в этом случае уменьшается.

2. Показано, что при переходе от первичных сплавов Zn5Al и Zn55Al к сплавам с титаном величина теплового расширения увеличивается, затем при переходе от сплавов с титаном к сплавам с цирконием величина теплового расширения уменьшается. Величина энтальпии и энтропии сплавов увеличивается при переходе от первичного сплава Zn5Al к сплавам с титаном и уменьшается при переходе от первичного сплава Zn5Al к сплавам с цирконием, при этом значение энергии Гиббса уменьшается. Для цинково-алюминиевого сплава Zn55Al с титаном и цирконием также характерны указанные закономерности. Сравнение значений теплоёмкости первичных сплавов показывает, что относительная теплоёмкость цинково-алюминиевого сплава Zn55Al выше, чем у сплава Zn5Al.

3. Термогравиметрическим методом исследована кинетика окисления цинково-алюминиевых сплавов систем Zn5Al + (Ti, Zr) и Zn55Al + (Ti, Zr) в твердом состоянии. Установлено, что окисление сплавов подчиняется гиперболическому закону. Реальная скорость окисления составляет порядка  $10^{-4}$  кг·м<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>. Установлено, что наименьшее значение скорости окисления и наибольшее значение активной энергии характерны для цинково-алюминиевого сплава Zn5Al с титаном и цирконием, а наибольшее значение скорости окисления для цинково-алюминиевого сплава Zn55Al с титаном и цирконием. Показано, что легирующие компоненты в пределах 0,01-0,5% по массе снижают окисление первичных цинково-алюминиевых сплавов.

4. Анодное поведение сплавов исследовали потенциостатическим методом в нейтральных средах (0,03; 3,0 % NaCl). Определено, что среди элементов цинково-алюминиевых сплавов Zn5Al и Zn55Al цирконий считается относительно эффективной добавкой, так как сплавы, обогащенные цирконием, характеризуются самыми низкими значениями скорости коррозии.

5. Показано, что с ростом концентрации хлорид-ион хлора в электролите коррозионный потенциал цинково-алюминиевых сплавов снижается, что сопровождается увеличением скорости коррозии сплавов в среде электролита NaCl.

6. Композиции в качестве анодно-защитных покрытий обрабатываемых сплавов защищены патентом Республики Таджикистан №TJ 1300 от 26.09.2022г

## II. Рекомендации по практическому использованию результатов

Обработанные сплавы могут быть использованы в качестве анодного покрытия для защиты стальных изделий и конструкций, сталей различных составов и изделий, эксплуатируемых при воздействии коррозии в естественной среде - воздухе, морской воде, речной воде, озерной воде, стратифицированной воде, почве, а также в среде нейтральных и слабощелочных водных растворов. Как неконструкционный материал обработанные цинково-алюминиевые сплавы могут быть использованы для литых анодов-протекторов, для приготовления припоев в производстве подшипников и гальванических элементов, в качестве покрытия стальных листов. Также результаты диссертационной работы могут быть использованы для практической работы по передовым направлениям современного машиностроения в качестве учебного пособия на лекционных и лабораторных профильных курсах высших учебных заведений. (Акт о практическом применении результатов прилагается в диссертационной работе).

### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНО В НИЖЕСЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ:

Статьи, опубликованные в рекомендованных в журналах ВАК-при Президенте Республики Таджикистан:

- [1-А]. Ганиев И.Н., Алиев Дж.Н., **Аминов Ф.М.**, Нарзуллоев З.Ф. Влияние добавок титана на потенциал коррозии сплава Zn5Al в среде электролита NaCl // Вестник Таджикского технического университета, №1(33). – Душанбе: Деваштич, 2016. -С. 24-27.
- [2-А]. Ганиев И.Н., Алиев Дж.Н., **Аминов Ф.М.**, Сафаров С.Г. Влияние титана на удельную теплоемкость и изменение термодинамических функций сплава Zn55Al // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1: Естественные и технические науки №1. – 2019. – С. 26-31.
- [3-А]. Ганиев И.Н., Алиев Дж.Н., **Аминов Ф.М.** Влияние циркония на удельную теплоемкость и изменений термодинамических функций цинкового сплава Zn55Al // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. №4. Т. 22. -2020. - С.13-19.
- [4-А]. **Аминов Ф.М.** Оксидшавии ҳўлаи рӯҳии Zn5Al бо сирконий дар ҳолати сахт, дар муҳити газӣ // Паёми Донишгоҳи технологии Тоҷикистон, № 1 (48). – 2022. –С. 24–31.
- [5-А]. Ganiev I.N., Aliev J.N., **Aminov F.M.** Influence of zirconium on microstructure and mechanical properties of zinc-aluminum alloys Zn5Al and Zn55Al // Polytechnic Bulletin. Series: Engineering research. № 2(58). 2022. - P.65-70.

### *Изобретения по теме диссертации:*

- [6-А]. Малый патент Республики Таджикистан, № ТЈ 1300. Цинково-алюминиевый сплав / Ганиев И.Н., Алиев Дж.Н., **Аминов Ф.М.**, Нарзуллоев З.Ф., Абдулло М.А. / №2101618; заявл. 27.12.2021, печать. 26.09.2022, Бюл. 187, 2022. –6с.

### *Статьи опубликованные в материалах международных и республиканских конференций:*

- [7-А]. **Аминов Ф.М.**, Ганиев И.Н., Алиев Дж.Н., Нарзуллоев З.Ф.. Анодное поведение сплавов Zn5Al и Zn55Al, легированных цирконием, в среде электролита NaCl // *Материалы республиканской научно-практической конференции «Проблемы материаловедения в машиностроении Республики Таджикистан».* АН Республики Таджикистан, Институт химии им. В.И. Никитина. - 2016. - С.80-83.
- [8-А]. **Аминов Ф.М.**, Ганиев И.Н., Алиев Дж.Н., Нарзуллоев З.Ф.. Влияние добавок титана на потенциал коррозии сплава Zn55Al в среде электролита NaCl. XIII Нумановские чтения. Достижения химической науки за 25 лет Государственной независимости Республики Таджикистан, посвящённые 70-летию образования Института химии имени В.И. Никитина Академии наук Республики Таджикистан. Душанбе - 2016. –С. 114-116.
- [9-А]. Алиев Дж.Н., Ганиев И.Н., **Аминов Ф.М.**, Нарзуллоев З.Ф. Влияние добавок титана на стационарный потенциал сплавов Zn5Al и Zn55Al, в среде электролита NaCl // *Материалы XX Международной научно-практической конференции.* Белгород –2016. № 11, часть 2 –С. 6-9.
- [10-А]. Алиев Дж.Н., **Аминов Ф.М.** Влияние добавок титана и циркония на твердость сплавов Zn5Al и Zn55Al // *Материалы Респ. научн. практич. конф. «Перспективы развития естественных наук» посвященной реализации «Программы развития естественных, математических и технических наук на 2010-2020 годы».* Российско – Таджикиский (Славянский) университет. - 2018. - С. 65-68.
- [11-А] Ганиев И.Н., Нарзуллоев З.Ф., **Аминов Ф.М.**, Алиев Ч.Н. Анодное поведение сплава Zn5Al, легированного титаном, в среде электролита NaCl // *Материалы Международной научно-практической конференции «перспективы использования материалов устойчивых к коррозии в промышленности республики Таджикистан»,* Институт химии им. В.И. Никитина. – 2018. - С.10-13.
- [12-А]. Одиназода Х.О., Алиев Дж.Н., **Аминов Ф.М.** Влияние циркония на изменение термодинамических функций сплава Zn55Al // *Маҷмӯи маводҳои конференсияи байналмилалӣ илмӣ-амалии донишҷӯён, магистрон, унвонҷӯён ва олимони ҷавон “Муҳандис-2019”.* Қисми I. ДТТ ба номи акад. М.Осимӣ. -2019. -С. 69-73.
- [13-А]. Саидзода Х.О., Алиев Дж.Н., **Аминов Ф.М.** Влияние циркония на удельную теплоемкость и коэффициента теплоотдачи сплава Zn55Al // *Маҷмӯи маводҳои конференсияи байналмилалӣ илмӣ-амалии донишҷӯён,*

магистрон, унвонҷӯён ва олимони ҷавон “Муҳандис-2019”. Қисми I. ДТТ ба номи акад. М.Осимӣ. -2019. -С. 73-77.

- [14-А]. **Аминов Ф.М.**, Саидзода Р.Х., Алиев Дж.Н., Ганиев И.Н. Влияние титана на изменение термодинамических функций сплава Zn55Al //Материалы IV международной научной конференции «Вопросы физической и координационной химий», посвященной памяти докторов химических наук, профессоров Якубова Хамида Мухсиновича и Юсуфова Зухриддина Нуриддиновича. ТНУ. – 2019. - С. 71-75.
- [15-А]. **Аминов Ф.М.**, Одиназода Х.О., Алиев Дж.Н., Ганиев И.Н. Влияние титана на удельную теплоемкость и коэффициента теплоотдачи сплава Zn55Al // Материалы IV международной научной конференции «Вопросы физической и координационной химий», посвященной памяти докторов химических наук, профессоров Якубова Хамида Мухсиновича и Юсуфова Зухриддина Нуриддиновича. ТНУ. – 2019. - С. 103-107.
- [16-А]. **Аминов Ф.М.**, Алиев Дж.Н., Ганиев И.Н., Сафаров А.Г. Влияние титана на изменение термодинамических функций сплава Zn5Al // Материалы научно-практической республиканской конференции «Индустриализация – фактор развития экономики республики», Бустон – 2020. - С. 4-6.
- [17-А]. **Аминов Ф.М.**, Алиев Дж.Н., Ганиев И.Н. Окисление кислородом газовой фазы цинкового сплава Zn5Al с титаном, в твердом состоянии // Материалы X-ой научно-практической конференции «Ломоносовские чтения». Част-I. Естественные науки, Филиал МГУ имени М.В. Ломоносова в г. Душанбе. – 2020. – С. 37-41.
- [18-А]. Дж.Н. Алиев, **Ф.М. Аминов**. Влияние титана на микроструктуру и механические свойства цинково-алюминиевого сплава Zn5Al // Материалы международной научно-практической конференции на тему: «Современные проблемы металлургической промышленности». ТТУ им. акад. М.С. Осими. – 2021. – С. 98-103.

## АННОТАЦИЯ

**к диссертации Аминова Фируз Миррахимовича на тему «Влияние титана и циркония на свойства цинковых сплавов Zn5Al и Zn55Al», на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальностям 05.16.09 – Материаловедение (в машиностроении) и 16.05.02 - Металлургия черных, цветных и редких металлов**

*Целью данной диссертации* является разработка состава оптимальных цинково-алюминиевых сплавов Zn5Al и Zn55Al, легированного титаном и цирконием, которые могут быть рекомендованы в качестве анодного покрытия для защиты от коррозии различных металлоконструкций, а также стальных конструкций и сооружений.

В качестве объекта исследования использовали цинк марки Ц1 (ГОСТ 3640-94), алюминий марки А7 (ГОСТ 11069-2001) и их лигатуры с титаном (2,5 % Ti) и цирконием (2 % Zr).

На основе экспериментальных исследований были выплавлены математические модели тепловых зависимостей теплопроводности, коэффициента теплопроводности, термодинамических функций (энтальпии, энтропии, энергии Гиббса) цинковых сплавов Zn5Al и Zn55Al с титаном и цирконием. Исследованы закономерности процесса высокотемпературного окисления тройных твердых сплавов Zn5Al+ (Ti, Zr) и Zn55Al+ (Ti, Zr) в атмосфере воздуха. Определено влияние титана и циркония на твердость и прочность сплавов Zn5Al и Zn55Al, также проведен микроструктурный анализ состава сплавов. Установлены закономерности изменения анодных характеристик сплавов Zn5Al и Zn55Al от содержания титана и циркония в электролитной среде NaCl.

Диссертация включает введение, 4 главы, выводы, список использованной литературы, состоящий из 138 наименования и приложений. Диссертация представлена на 187 компьютерных страницах, состоит из 63 таблиц и 57 рисунков.

*Публикации:* По результатам исследования опубликовано 18 научных работ, из них 5 в журналах, рекомендуемых ВАК при Президенте Республики Таджикистан, 12 публикаций в публикациях международных и республиканских конференциях, а также получен 1 малый патент Республики Таджикистан № TJ 1300 на «Цинково-алюминиевый сплав».

*Ключевые слова:* Цинково-алюминиевые сплавы Zn5Al и Zn55Al, титан, цирконий, коэффициент теплоотдачи, теплоемкость, термодинамические функции, термогравиметрический метод, кинетика окисления, истинная скорость окисления, энергия активации, твердость, прочность, потенциостатический метод, потенциалы свободной коррозии, питтингообразования, репассивации, скорость коррозии, микроструктура сплавов.

## ШАРҲИ МУХТАСАР

**ба рисолаи номзиди Аминов Фируз Миррахимович дар мавзӯи «Таъсири титан ва сирконий ба хосиятҳои хӯлаҳои рӯҳии Zn5Al ва Zn55Al», ки барои дарёфти дараҷаи илмии номзиди илмҳои техникӣ аз рӯи ихтисосҳои  
05.16.09 – Масолахшиносӣ (дар мошинсозӣ) ва  
05.16.02 – Металлургияи металҳои сиёҳ, ранга ва нодир**

*Мақсади ин рисолаи номзидӣ дар қоркарди таркиби хӯлаҳои муносиби рӯҳӣ-алюминийи Zn5Al ва Zn55Al бо титан ва сирконий чавҳаронидашуда мебошад, ки ҳамчун рӯйпӯши анодӣ барои ҳимоя аз зангзании конструкцияҳои*



металли таъиноташон гуногун, инчунин иншоот ва конструкцияҳои пӯлодӣ тавсия дода мешавад.

*Ҳамчун объекти тадқиқот* рӯҳи тамғаи Ц1 (ГОСТ 3640-94), алюминийи тамғаи А7 (ГОСТ 11069 - 2001) ва ҷавҳарикунандаҳои онҳо бо титан (2,5% Ti) ва бо сирконий (2% Zr) истифода шудаанд.

*Дар асоси тадқиқотҳои таҷрибавӣ* амсилаҳои математикии вобастагҳои ҳароратии гармиғунҷоиш, коэффитсиенти гармидиҳӣ ва функцияҳои термодинамикии (энталпия, энтропия, энергияи Гиббс) ҳӯлаҳои рӯҳӣ-алюминийи Zn5Al ва Zn55Al бо титан ва сирконий ҷавҳаронидашуда дарёфт карда шуд. Қонуниятҳои раванди оксидшавии баландҳарорати ҳӯлаҳои саҳти сегонаи Zn5Al + (Ti, Zr) и Zn55Al + (Ti, Zr) дар муҳити ҳаво тадқиқ карда шудаанд. Таъсири титан ва сирконий ба саҳтӣ ва устувории ҳӯлаҳои рӯҳии Zn5Al ва Zn55Al муайян карда шуд ва таҳлили соҳти таркибии ҳӯлаҳо иҷро гардид. Қонуниятҳои тағйирёбии тавсияҳои анодии ҳӯлаҳои рӯҳии Zn5Al ва Zn55Al аз миқдори титан ва сирконий дар муҳити электролити NaCl муқаррар карда шуд.

*Рисолаи номзадӣ* сарсухан, 4 боб, хулосаҳо, рӯйхати адабиётҳои истифодашудаи иборат аз 138 номгӯй ва замимаро фаро гирифтааст. Рисола дар 187 саҳифаи чопи компютерӣ баён гардида аз 63 ҷадвал ва 57 расм иборат мебошад.

*Интишор:* Аз натиҷаҳои тадқиқот 18 кори илмӣ чоп гардидааст, ки аз онҳо 5-то дар маҷалаҳои тақризии КОА-и назди Президенти Ҷумҳурии Тоҷикистон, 12 интишор дар маводҳои конференсияҳои байналмилалӣ ва ҷумҳуриявӣ, инчунин 1 нахустпатенти Ҷумҳурии Тоҷикистон № ТҶ 1300 ба «Хӯлаи рӯҳӣ-алюминий» дарёфт карда шудааст.

*Калимаҳои вожавӣ:* Хӯлаи рӯҳӣ-алюминийи Zn5Al ва Zn55Al, титан, сирконий, коэффитсиенти гармидиҳӣ, гармиғунҷоиш, функцияҳои термодинамикӣ, усули термогравиметрӣ, кинетикаи оксидшавӣ, суръати ҳақиқии оксидшавӣ, энергияи фаъоли эҳтимолӣ, саҳтӣ, мустакамӣ, усули потенциостатикӣ, потенциалҳои зангзании фаъол, питтингҳосилкунӣ, репассиватсия, суръати зангзанӣ, соҳти таркибии ҳӯлаҳо.

## ANNOTATION

**to the dissertation of Aminov Firuz Mirrakhimovich on the topic "The influence of titanium and zirconium on the properties of zinc alloys Zn5Al and Zn55Al", for the degree of candidate of technical sciences in the specialties 05.16.09 - Materials Science (in mechanical engineering) and 16.05.02 - Ferrous, non-ferrous and rare metallurgy metals**

*The purpose of this dissertation* is to develop the composition of optimal zinc-aluminum alloys Zn5Al and Zn55Al alloyed with titanium and zirconium, which can be recommended as an anode coating for corrosion protection of various metal structures, as well as steel structures and structures.



*The object of the study* zinc grade Ts1 (GOST 3640-94), aluminum grade A7 (GOST 11069-2001) and its ligaturis with titanium (2.5% Ti) and zirconium (2% Zr).

Based on experimental studies, mathematical models of thermal dependences of thermal conductivity, thermal conductivity, thermodynamic functions (enthalpy, entropy, Gibbs energy) of Zn5Al and Zn55Al zinc alloys with titanium and zirconium were melted. The regularities of the process of high-temperature oxidation of ternary hard alloys Zn5Al+ (Ti, Zr) and Zn55Al+ (Ti, Zr) in air were studied. The effect of titanium and zirconium on the hardness and strength of Zn5Al and Zn55Al alloys was determined, and a microstructural analysis of the composition of the alloys was also carried out. Regularities of changes in the anodic characteristics of Zn5Al and Zn55Al alloys depending on the content of titanium and zirconium in NaCl

of international and republican conferences, and 1 small patent of the electrolyte medium have been established.

*The dissertation includes* an introduction, 4 chapters, conclusions, a list of references, consisting of 138 titles and applications. The dissertation is presented on 187 computer pages, consists of 63 tables and 57 figures.

*Publications:* Based on the results of the study, 18 scientific papers were published, 5 of them in journals recommended by the Higher Attestation Commission under the President of the Republic of Tajikistan, 12 publications in publications Republic of Tajikistan No. TJ 1300 for "Zink-aluminum" alloy was received .

*Key words:* Zinc-aluminum alloys Zn5Al and Zn55Al, titanium, zirconium, heat transfer coefficient, heat capacity, thermodynamic functions, thermogravimetric method, oxidation kinetics, true oxidation rate, activation energy, hardness, strength, potentiostatic method, free corrosion potentials, pitting formation, repassivation , corrosion rate, microstructure of alloys.

Ба матбаа супорида шуд 12.01.2022.

Ба чопаш 23.01.2022 имзо шуд.

Қоғаз офсетӣ. Ҳуруфи арабӣ.

Гарнитура Nimes Nev Roman Nj

Тъдод 50

Матбааи ДТТ ба номи академик М.С.Осимӣ  
734042, ш. Душанбе, хиёбони академик Раҷабовҳо 10



