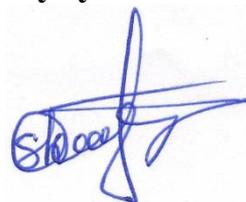


**ВАЗОРАТИ МАОРИФ ВА ИЛМИ ҶУМҲУРИИ ТОҶИКИСТОН**

**ДОНИШГОҶИ ТЕХНИКИИ ТОҶИКИСТОН  
БА НОМИ АКАДЕМИК М.С.ОСИМӢ  
АКАДЕМИЯИ МИЛЛИИ ИЛМҶОИ ТОҶИКИСТОН  
МДИ «ИНСТИТУТИ КИМИӢИ БА НОМИ В.И. НИКИТИН»**

**Бо ҳуқуқи дастнавис**



**ШЕРАЛИЗОДА Ориф Шерали  
(ДАВЛАТОВ Ориф Шералиевич)**

**ХОСИЯТҶОИ ФИЗИКАВӢ - КИМИӢВИИ ХӢЛАИ  
АЛЮМИНИИ АЖ2.4М5.3МГ1.1Ц4КР3 БО ҚАЛЪАГӢ, СУРБ  
ВА ВИСМУТ ҶАВҶАРОНИДАШУДА**

**ДИССЕРТАСИЯ**

барои дарӢфти дараҷаи илмии  
номзади илмҶои техникӢ

Ихтисос: 2.4.15. МаводшиносӢ дар саноати мошинсозӢ

**Роҳбари илмӢ:**

доктори илмҶои химия, академики  
АМИ Тоҷикистон, профессор,  
**Ғаниев Изатулло Наврузович**

**Душанбе – 2026**

<b>Мундариҷа</b>	
НОМГҶИ ИХТИСОРАҶО, АЛОМАТҶОИ ШАРТӢ.....	4
МУҚАДИМА.....	5
ТАВСИФИ УМУМИИ ТАДҚИҚОТ.....	7
<b>БОБИ 1. ТАШАКУЛИ СОҲТ ВА ХОСИЯТҶОИ ФИЗИКИЮ ХИМИЯВИИ ХӢЛАИ АЛЮМИНИИ БО ҚАЛЪАГӢ, СУРБ ВА ВИСМУТ ЧАВҶАРОНИДАШУДА.....</b>	<b>14</b>
1.1. Соҳт ва хосиятҶои хӢлаҶои алюминиӣ бо оҳан, мис, кремний, қалъагӢ, сурб ва висмут.....	14
1.2. ХосиятҶои физикии алюминиӣ, оҳан, магний, кремний, мис ва хӢлаи алюминиӣ АЖ2.18 бо қалъагӢ, сурб ва висмут чавҶаронидашуда.....	27
1.3. Кинетикаи оксидшавии хӢлаи алюминиӣ бо оҳан, магний, кремний ва хӢлаи алюминиӣ АЖ2.18 бо қалъагӢ, сурб ва висмут..	38
1.4. Рафтори анодии хӢлаҶои алюминиӣ бо оҳан, қалъагӢ, сурб, висмут ва хӢлаи алюминиӣ АЖ2.18.....	46
1.5. Хулоса аз баррасии адабиёт ва масъалагузорӣ.....	59
<b>БОБИ 2. ВОБАСТАГИИ ГАРМИҶУНҶОИШ АЗ ҶАРОРАТ ВА ТАҶӢИРӢБИИ ФУНКСИЯҶОИ ТЕРМОДИНАМИКИИ ХӢЛАИ АЛЮМИНИИ АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 БО ҚАЛЪАГӢ, СУРБ ВА ВИСМУТ ЧАВҶАРОНИДАШУДА.....</b>	<b>61</b>
2.1. Схемаи дастгоҳ ва усулҶои ченкунии гармиҶунҶоиши ҷисмҶои саҳт	61
2.2. ГармиҶунҶоиш ва функсияҶои термодинамикӣ хӢлаҶи алюминиӣ АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 вобаста аз ҷарорат.....	67
2.3. ГармиҶунҶоиш ва функсияҶои термодинамикии хӢлаи алюминиӣ АЖ2.4М5.3МГ1.1Ц4КР3 бо қалъагӢ.....	73
2.4. ХусусиятҶои теплофизикӣ ва функсияҶои термодинамикӣ хӢлаи алюминиӣ АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо сурб чавҶаронидашуда	80
2.5. ГармиҶунҶоиш ва функсияҶои термодинамикии хӢлаи алюминиӣ АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо висмут чавҶаронидашуда....	87

2.6. Таъсири қалъагӣ, сурб ва висмут ба сохти таркибии хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3.....	93
2.7. Хулосаи боби 2.....	98
<b>БОБИ 3. КИНЕТИКАИ ОКСИДШАВИИ ХҶЛАИ АЛЮМИНИЙИ АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3, БО ҚАЛЪАГӢ, СУРБ ВА ВИСМУТ ЧАВҲАРОНИДАШУДА.....</b>	<b>100</b>
3.1. Дастгоҳ ва методикаи омӯзиши кинетикаи оксидшавии хӯлаҳо	100
3.2. Кинетикаи оксидшавии хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо қалъагӣ.....	101
3.3. Кинетика окисления алюминиевого сплава АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 со свинцом.....	109
3.4. Таъсири висмут ба кинетикаи оксидшавии хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3, дар ҳолати сахтӣ.....	116
3.5. Хулосаи боби 3.....	122
<b>БОБИ 4. РАФТОРИ КОРРОЗИОНӢ-ЭЛЕКТРОКИМИӢВИИ ХҶЛАИ АЛЮМИНИЙИ АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 БО ҚАЛЪАГИ, СУРБ ВА ВИСМУТ ЧАВҲАРОНИДАШУДА.....</b>	<b>126</b>
4.1. Усули потенциостатикӣ тадқиқоти коррозионӣ-электрохимии сохти хӯлаи алюминий дар муҳити ишқорӣ NaCl.	126
4.2. Таъсири қалъагӣ ба рафтори анодии хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3, дар муҳити электролитии NaCl.....	128
4.3. Таъсири сурб ба рафтори анодии хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3.....	134
4.4. Таъсири висмут ба рафтори анодии хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3.....	139
4.5. Хулосаи боби 4.....	145
<b>ХУЛОСАҲО.....</b>	<b>149</b>
<b>АДАБИӢТ.....</b>	<b>152</b>
<b>ЗАМИМА 1.....</b>	<b>165</b>
<b>ЗАМИМА 2.....</b>	<b>166</b>

## НОМГҶИ ИХТИСОРАҶО, АЛОМАТҶОИ ШАРТӢ

КОА	Комиссияи олии аттестатсионӣ
АМИТ	Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон
ДТТ ба номи акад. М.С.Осимӣ	Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С.Осимӣ
АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3	Хӯлаи алюминий бо Fe -2.4 % - мас.; Cu – 5.3 % - мас.; Mg-1.1% - мас.; Zn – 4 % - мас.; Si-3% - мас.
ГОСТ	Стандарти давлатӣ
БИОМЕД	Микроскопи электрони мушоҳидавӣ
ПИ	Потенсиали импульсӣ
СШОЛ	Оташдони барқии озмоишгоҳӣ
ЛАТР	Автотрансформатори озмоишгоҳӣ
ТШ-2	Асбоб барои санҷидани сахтӣ бо усули Бринел
АРВ-200	Тарозуи таҳлилӣ
-Есв.корр.	Потенсиали коррозияи озод
-Екорр.	Потенсиали коррозия
-Еп.о.	Потенсиали питтингҳосилшавӣ
-Ереп.	Потенсиали репассиватсия
-Ест.	Потенсиали статсионарӣ
-ікорр.	Зичии ҷараёни коррозия

## МУҚАДИМА

*Мубрамӣ ва зарурияти гузаронидани тадқиқот дар мавзуи диссертатсия.* Дар солҳои охир таваҷҷуҳ ба таҳия ва татбиқи маводди нави конструксионии дорои хосиятҳои беҳтари механикӣ ва муқовимати баланд ба коррозия нисбат ба маводди анъанавӣ афзуда истодааст. Бо дарназардошти ин, тадқиқ ва коркарди хӯлаҳои нави алюминий бо иловаи элементҳои гуногуни чавҳаркунанда, ки ба муҳитҳои фаъол устувор буда, қобилияти баландтари пароканда кардани энергия доранд, аҳамияти махсус касб мекунад [1].

Пӯлод яке аз масолеҳи маъмултарин барои истеҳсоли дастгоҳҳо, таҷҳизот, қисмҳои гуногун ва конструксияҳо ба ҳисоб меравад. Аммо дар солҳои охир алюминий ва хӯлаҳои он бо сабаби хосиятҳои муфиди физикию химиявии худ бештар актуалӣ мегарданд, ки онҳо ҳангоми илова кардани металҳои дигар метавонанд сифати баланди техниро таъмин кунанд. Ҳамчунин, омили муҳимми паҳншавӣ ва истифодаи васеи он – арзон будани алюминий дар тамоми қишри замин, аз ҷумла дар Ҷумҳурии Тоҷикистон мебошад. Ҷустуҷӯ ва коркарди омехтаҳои нави таркиби алюминий ва навҳои масолеҳ метавонад барои ҷумҳурӣ аҳамияти бузург дошта бошад ва ҳамчун фишанги иловагӣ дар роҳи саноатикунории босуръат, механизатсия ва инчунин ивазкунии қисмҳо ва мошинҳои, ки аз хориҷа ворид мешаванд, хизмат кунад.

Хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1ц4кр3 дар асоси ашӯи хоми дуюмдараҷа ҳамчун замимаҳои тамоси хатҳои троллейбус истифода мешавад. Камбудии ин хӯлаи алюминий коэффитсиенти соиши баланди он мебошад, ки муҳлати истифодаи маҳсулоти аз он сохташударо коҳиш медиҳад. Барои кам кардани коэффитсиенти соиши лағжиш ва беҳтар кардани дигар хусусиятҳои механикии ин хӯла дар рисола чавҳаронидани хӯла бо металҳои зудгудохташаванда аз қабилӣ қалъагӣ, сурб ва висмут баррасӣ карда мешавад.

Набудани маълумот дар адабиёт дар бораи хосиятҳои физикию химиявӣ, механикӣ ва зангзании хӯлаи алюминий АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо қалъагӣ, сурб ва висмут таваҷҷуҳи моро ба омӯзиши хосиятҳои гармӣ, термодинамикӣ, кинетикӣ ва коррозионӣ-электрохимиявии ин хӯла ва таҳияи хӯлаҳои нав барои

истеҳсоли замимаҳои тамоси хатҳои троллейбус ва дигар соҳаҳои саноат водоркард.

**Дарачаи коркарди илми масъалаҳои мавриди таҳқиқ.** Ба таҳқиқ ва коркарди таркибҳои хӯлаҳои нави алюминий корҳои олимони шӯравӣ, русӣ ва хориҷӣ бахшида шудаанд. Ҷанбаҳои гуногуни сохтор, таркиби фазавӣ, хосиятҳои механикӣ ва зангзанандаи ин хӯлаҳо аз ҷониби Ф.И. Квасов [1], И.Н. Фридляндер [2], Е.И. Кутайцева [3], Д.А. Петров [4], Ю.Г. Каблов [5], О. А. Кайбышев [6], К.Н. Михайлов [7], А.Е. Семёнов [8], В.Н. Барангиков [9], инчунин муҳаққиқони хориҷӣ, аз ҷумла G.W. Edington [10], J.W. Cahn [11], L.F. Mondolfo [12], J.E. Hatch [13], I.J. Polmear [14; 16], J.R. Davis [15], D.J. Lloyd [17], R. Kampmann [18], R.G. Kelly [19], А. А. Ильин [20] мавриди омӯзиш қарор гирифтаанд.

Бо шарофати саҳми онҳо то имрӯз сатҳи баланди дарки назариявии равандҳое, ки ҳангоми ташаккули сохтор ва таркиби фазавии хӯлаҳои алюминий ба амал меоянд, инчунин қонуниятҳои тағйирёбии хосиятҳои физикӣ-механикӣ ва зангзанандаи онҳо ба даст оварда шудааст.

Дар адабиёти муосири илмӣ то ҳол таъсири қалъагӣ, сурб ва висмут ба сохтор, хосиятҳои механикӣ, гармофизикӣ ва электрохимиявии хӯлаҳои алюминий ба таври кофӣ омӯхта нашудааст.

**Робитаи тадқиқот бо барномаҳо (лоихаҳо), мавзӯҳои илмӣ.** Мавзӯи кори диссертсионӣ қисми таркибии лоихаи илмӣ «Таҳияи таркиби хӯлаҳои нави алюминийи ноқилӣ ва додани тавсияҳо оид ба истифодаи онҳо ба корхонаҳои Ҷумҳурии Тоҷикистон» мебошад, ки аз ҷониби озмоишгоҳи «Маводҳои ба коррозия устувор»-и Институти кимиёи ба номи В.И. Никитини АМИ Тоҷикистон» барои солҳои 2021-2025 таҳия карда шудааст. Кор дар доираи Барномаи саноатикунони босуръати Ҷумҳурии Тоҷикистон барои солҳои 2020-2025, Барномаҳои миёнамуҳлати рушди Ҷумҳурии Тоҷикистон барои солҳои 2021-2025 ва ғайра ба нақша гирифта шудааст. Татбиқи ин барномаҳо иҷроиши ҳуҷҷати асоси кишвар - Стратегияи рушди Ҷумҳурии

Тоҷикистон барои давраи то соли 2030-ро таъмин менамоянд, ки мувофиқи он Тоҷикистон аз модели аграрӣ-индустириалӣ ба модели индустриалӣ - аграрии рушд мегузарад.

## ТАВСИФИ УМУМИИ ТАДҚИҚОТ

**Мақсади тадқиқот** муайян кардани хосиятҳои термофизикӣ, термодинамикӣ, кинетикӣ ва анодии хӯлаи алюминий АЖ2.4М5.3МГ1.1ц4кр3 бо қалъагӣ, сурб, висмут ва истифодаи натиҷаҳои бадастомада ҳангоми таҳияи таркиби композитсияҳои нави хӯлаҳо барои эҳтиёҷоти техника мебошад.

### *Вазифаҳои тадқиқот.*

1. Омӯзиши вобастагии ҳароратии хосиятҳои термофизикӣ ва тағйирёбии функсияҳои термодинамикии хӯлаи алюминий АЖ2.4М5.3МГ1.1ц4кр3 бо қалъагӣ, сурб ва висмут.

2. Омӯзиши кинетикаи оксидшавии хӯлаи алюминий АЖ2.4М5.3МГ1.1Ц4Кр3 бо қалъагӣ, сурб ва висмут дар ҳолати саҳт инчунин муайян кардани хусусият ва механизми раванди оксидшавии онҳо.

3. Тадқиқ намудани таъсири иловаҳо аз қабилӣ қалъагӣ, сурб ва висмут ба рафтори анодии хӯлаи алюминий навъи АЖ2.4М5.3МГ1.1Ц4Кр3 бо роҳи таҷрибавӣ, дар муҳити электролити NaCl бо консентратсияҳои мухталиф.

4. Беҳтар намудани хосиятҳои таркибии хӯлаҳо ба воситаи муайян намудани соҳти онҳо, хосиятҳои термофизикӣ, физикавию химиявӣ ва механикии онҳо, инчунин ҳифзи натиҷаҳо бо патенти хурди Ҷумҳурии Тоҷикистон.

5. Иҷро кардани таҳлили металографии хӯлаи рӯҳ-алюминийи АЖ2.4М5.3МГ1.1Ц4Кр3 бо қалъагӣ, сурб ва висмут ҷавҳаронидашуда бо ёрии микроскопи монокулярӣ тамғаи БИОМЕД - 1 (Украина).

6. Муайян кнамудани таъсири иловаҳои қалъагӣ, сурб ва висмут ба нишондиҳандаҳои саҳтӣ ва мустаҳкамӣ хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3МГ1.1Ц4Кр3 бо истифодаи асбоби саҳтисанҷӣ тамғаи ТШ-2.

**Объекти тадқиқот.** Ба сифати объекти тадқиқот хӯлаи алюминий, аз чумла хӯлаи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо қалъагӣ, сурб ва висмут цавҳаронидашуда интихоб гардид.

**Мавзуи тадқиқот:** ҳамчун мавзуи тадқиқот синтез, тадқиқи гармиғунҷоиш ва функцияҳои термодинамикии хӯлаи алюминий АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо қалъагӣ, сурб ва висмут, омӯзиши хосиятҳои механикии ин хӯлаҳо, кинетикаи оксидшавӣ ва хосиятҳои электрохимиявии хӯлаҳо ба ҳисоб меравад.

**Усулҳои тадқиқот ва истифодабарии таҷҳизот:**

– усули тадқиқи гармиғунҷоиши хӯлаҳо дар режими “хунукшавӣ” бо истифода аз сабткунандаи худкори ҳарорат вобаста ба вақти хунукшавии хӯлаҳо;

– усули металлографии таҳлили хӯлаҳои синтезшуда бо истифода аз микроскопи монокулярӣ тамғаи БИОМЕД-1;

– усули Бринелл барои муайян намудани сахтии металҳо (ТШ-2);

– омӯхтани раванди кинетикаи оксидшавии хӯлаҳои алюминийи мазкур бо усули термогравиметрӣ дар муҳити муқаррарӣ (оксигени ҳаво), дар ҳолати сахтӣ;

– ИК-спектроскопия (бо спектрометри SPECORD-75) ва рентенофазавай (РФА бо дифрактометри ДРОН-3) барои таҳлили маҳсулоти оксидшавии хӯлаҳо;

– усули потенциостатикӣ барои омӯзиши хосиятҳои анодии хӯлаҳо дар речаи потенциодинамикӣ бо истифода аз потенциостати ПИ 50-1.1.

Қоркарди математикии натиҷаҳои ҷенкунӣ бо истифода аз бастаи стандартии барномаҳо ва замимаи Microsoft Excel анҷом дода шудааст.

**Соҳаҳои тадқиқот** маводшиносӣ, техникаи нақлиётӣ ва мошинсозӣ мебошанд.

**Марҳилаҳои тадқиқот.** Тадқиқоти кори рисола марҳилаҳои синтез ва сертификатсияи хӯлаҳои нави алюминий, муайян кардани таъсири қалъагӣ,

сурб ва висмут ба хосиятҳои механикӣ, муайян кардани гармиғунҷоиши ҳӯлаҳо дар речаи "хунукшавӣ", ҳисоб кардани функцияҳои динамикаи гармои ҳӯлаҳо, муқаррар кардани параметрҳои кинетикӣ ва маҳсулоти оксидшавии ҳӯлаҳо, хосиятҳои электрохимиявӣ ва рафтори анодии ҳӯлаи алюминий АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо қалъагӣ, сурб ва висмутро дар бар мегирад.

Маълумоти ибтидоӣ ва базаи таҷрибавӣ: Тадқиқоти таҷрибавӣ бо истифода аз таҷҳизоти маъмули илмӣ, аз ҷумла спектрометри SPECORD-75, дифрактометри ДРОН-3, потенциостати П-50.1.1, дастгоҳ барои тадқиқи хосиятҳои гармофизикии ҳӯлаҳо дар речаи "хунуккунӣ" ва тарозуҳои термогравиметрӣ анҷом дода шудаанд. Қоркарди математикии натиҷаҳои ҷенкунӣ бо истифода аз бастаи стандартии замима ва барномаи Microsoft Excel ва Sigma Plot ба анҷом расонида шуд.

Дараҷаи эътимоднокии натиҷаҳо. Саҳеҳияти натиҷаҳои тадқиқот бо истифода аз усулҳои муосири таҳлил, таҷҳизоти замонавӣ ва такмилёфта таъмин гардида, бо натиҷаҳои мавҷудаи адабиётӣ муқоиса ва тасдиқ карда шудааст.

#### **Навгониҳои илмӣ тадқиқот.**

1. Қонуниятҳои асосии гармиғунҷоиш ва тағйирёбии функцияҳои термодинамикӣ (энталпия, энтропия ва энергияи Гиббс) ҳӯлаҳои алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо қалъагӣ, сурб ва висмут ҷавҳаронидашуда вобаста аз таркиби компонентҳои лигарӣ дар ҳӯлаҳо ва ҳарорат муқаррар карда шуд.

2. Муайян карда шуд, ки бо афзоиши ҳарорат бузургии гармиғунҷоиш, энталпия ва энтропияи ҳӯлаи алюминий АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 афзоиш меёбанд, ва миқдори энергияи Гиббс коҳиш меёбад. Инчунин, ҳангоми тағйир ёфтани миқдори компонентҳои лигарӣ (қалъагӣ, сурб ва висмут) дар таркиби ҳӯлаи мазкур, коҳишёбии бузургиҳои энталпия ва энтропия мушоҳида гардида, бузургии энергияи Гиббс зиёд мегардад. Муайян карда шудааст, ки ҳӯлаҳои алюминий АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо сурб ҷавҳаронидашуда дар муқоиса бо

хӯлаҳои бо қалъагӣ бо висмут чавҳаронидашуда гармиғунҷоиши нисбатан зиёд дорад.

3. Қонуниятҳои тағйирёбии хусусиятҳои кинетикӣ ва энгергетикии раванди оксидшавӣ, хӯлаҳои алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо қалъагӣ, сурб ва висмут чавҳаронидашуда дар ҳолати сахтӣ муайян карда шудааст. Дар ташаккулёбии таркиби фазавии маҳсулоти оксидии хӯлаҳои ибтидоӣ, мавқеи компонентҳои лигари дар механизми оксидшавӣ муайян карда шуд.

4. Қонуниятҳои тағйирёбии рафтори анодии хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 вобаста ба миқдори қалъагӣ, сурб ва висмут дар муҳити электролити NaCl муайян карда шудааст. Тадқиқот нишон дод, ки компонентҳои лигарӣ дар доираи консентратсияи 0,01 - 0,5 %-масса ба коҳиши назарраси суръати зангзании хӯлаи асосӣ мусоидат менамояд. Инчунин муайян гардид, ки иловаи ин элементҳо муқовимати хӯларо ба зангзанӣ то 15-20% афзоиш медиҳад.

**Аҳамияти назариявӣ тадқиқот.** Дар рисола ҷанбаҳои назариявӣ тадқиқоти таъсири сохтор ва ҳарорат ба тағйирёбии гармиғунҷоиш ва функцияҳои термодинамикӣ, хусусиятҳои кинетикӣ ва энергетикӣ, рафтори коррозионию электрохимиявӣ хӯлаҳои алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо қалъагӣ, сурб ва висмут чавҳаронидашуда: таъсири муҳити коррозионӣ ва консентратсияи иловаҳои лигарӣ ба коррозияустуворӣ ва оксидшавии хӯлаи ибтидоӣ дарҷ гардидааст.

**Аҳамияти амалии тадқиқот.** Аҳамияти амалии тадқиқот дар таҳияи хӯлаҳои таркибашон нав зоҳир мегардад, ки бо оксидшавии кам дар ҳарораҳои баланд фарқ дошта, интихоби консентратсияи мувофиқи элементҳои чавҳарӣ (қалъагӣ, сурб ва висмут) барои баланд бардоштани муқовимат ба коррозияи хӯлаи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 мусоидат менамояд. Таркиби нави хӯла, ки бо иловаи қалъагӣ, сурб ва висмут таҳия шудааст, бо патенги хурди Ҷумҳурии Тоҷикистон ҳифз гардидааст (№ ТҶ1179 аз 29.03.2021).

## **Натиҷаҳои асосие, ки ба ҳимоя пешниҳод мегарданд:**

1. Натиҷаҳои тадқиқоти вобастагии ҳарорат ба хосиятҳои гармофизикӣ, коэффитсиенти гармигузаронӣ ва тағйирёбии функсияҳои термодинамикии хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо иловаҳои қалъагӣ, сурб ва висмутро нишон медиҳад.

2. Натиҷаҳои тадқиқоти кинетикаи оксидшавии хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо қалъагӣ, сурб ва висмут чавҳаронидашуда дар ҳолати сахтӣ ва механизми оксидшавии онҳо.

3. Натиҷаҳои тадқиқоти рафтори коррозионӣ-электрохимиявии хӯлаи алюминийи навъи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3, ки бо қалъагӣ, сурб ва висмут чавҳаронида шудааст, дар муҳити электролити NaCl бо консентратсияҳои гуногун таҳлил шудаанд.

4. Таркибҳои оптималии хӯлаҳо, ки бо оксидшавии нисбатан кам ва устувории баланди зидди коррозия фарқ мекунанд, ҳамчун маводди конструксионӣ барои ҳифзи маснуот ва конструксияҳои пӯлодӣ аз зангзанӣ, инчунин ҳамчун замимаҳои расиши хатҳои троллейбусҳо аҳамияти махсус доранд.

**Дарачаи эътимоднокии натиҷаҳо.** Эътимоднокии натиҷаҳои тадқиқотро истифодаи усулҳои муосири тадқиқот бо асбобу дастгоҳҳои модернизатсияшуда ва мукамал, такроршавандагии онҳо ва муқоисаи натиҷаҳо бо маълумоти муаллифони дигар таъмин менамояд.

**Мутобиқати диссертатсия ба шиносномаи ихтисоси илмӣ.** Натиҷаҳои рисолаи диссертатсионӣ ва наwgониҳои илмӣ ба даст омада, ба бандҳои зерини шиносномаи феҳристи ихтисосҳои КОА-и назди Президенти Ҷумҳурии Тоҷикистон аз рӯйи самти ихтисоси 2.4.15 – Маводшиносӣ дар саноати мошинсозӣ мутобиқат мекунад:

**банди – 1.** Тадқиқоти назариявӣ ва таҷрибавии алоқаи фундаменталии таркиб ва сохтори мавод бо маҷмуи хосиятҳои физикӣ-механикӣ ва корфармой бо мақсади таъмини эътимоднокӣ ва дарозумрии мавод ва маснуот;

**банди – 2.** Муқаррар намудани қонуниятҳо дар равандҳои физикӣ-химиявӣ ва физикӣ-механикӣ;

**банди – 3.** Таҳияи асосҳои илмии интихоби мавод барои хосиятҳои додашуда дар шароити мушаххасии истеҳсол ва истифодаи маснуот ва конструкцияҳо;

**банди – 4.** Таҳияи равандҳои физикӣ-химиявӣ ва физикӣ-механикии ташаккул додани маводди нав, ки дорои хосиятҳои беназири функсионалӣ, физикӣ-механикӣ, хосиятҳои корфармоӣ ва технологӣ, арзиши муносиб (оптималӣ) ва тозагии экологӣ мебошанд;

**банди – 10.** Кор карда баромадани роҳҳои баланд бардоштани тобоварӣ ба зангзании мавод дар шароити гуногуни кор.

**Ба марҳилаҳои тадқиқот** таҳлили ҳолати масъала ва муайян кардани мақсад ва вазифаҳои тадқиқот, истеҳсоли хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо қалбагӣ, сурб ва висмут чавҳаронидашуда бо пайдарпаи тадқиқоти таҷрибавии гармофизикӣ ва функцияҳои термодинамикӣ, электрохимиявӣ, зангзании газӣ ва хосиятҳои механикӣ онҳо дохил мешаванд.

**Саҳми шахсии муаллиф** иборат аст аз таҳлили маълумоти адабиёт, пешниҳод ва ҳалли масъалаҳои тадқиқотӣ, омодагӣ ва анҷом додани таҷрибаҳо дар шароити озмоишгоҳӣ, таҳлили натиҷаҳои бадастомада, шарҳ ва пешниҳод намудани муқаррарот ва хулосаҳои рисола, инчунин нашри натиҷаҳои тадқиқот.

**Тасвиб ва амалисозии натиҷаҳои диссертатсия.** Конференсияи байналмилалии илмӣ-амалӣ таҳти унвонӣ "Рушди саноат ва инноватсионии иқтисодиёти Ҷумҳурии Тоҷикистон: вазъият, мушкилот ва дурнамо", Душанбе, 2020; Конфронси байналмилалии илмӣ-амалии "Рушди энергетика ва имкониятҳо", ноҳияи Кушонӣён, вилояти Хатлон, Ҷумҳурии Тоҷикистон, 2020; Конфронси байналмилалии илмӣ-амалии "Полиграфия: ҳолат ва рушди дурнамои он", Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ, Душанбе, 2020; Конфронси илмию амалии ҷумҳуриявӣ бахшида ба 30-

солагии Истиқлолияти Ҷумҳурии Тоҷикистон ва 25-солагии Донишгоҳи русӣ-тоҷикӣ (славянӣ), Душанбе, 2021; Конфронси илмию амалии ҷумҳуриявӣ "Рушди инноватсионии илм" бо иштироки созмонҳои байналмилалӣ, Душанбе, 2020.

**Интишорот аз рӯйи мавзӯи диссертатсия.** Натиҷаҳои тадқиқот дар 18 нашрияи илмӣ ба ҷоп расидаанд, аз ҷумла 8 мақола дар маҷалаҳои илмӣ аз ҷониби ҚОА назди Президенти Ҷумҳурии Тоҷикистон тавсияшуда ва 9 мақола дар маводди конференсияҳои байналмилӣ ва ҷумҳуриявӣ нашр гардидаанд. Илова бар ин, 1 патенти хурди Ҷумҳурии Тоҷикистон ба даст оварда шудааст.

**Сохтор ва ҳаҷми диссертатсия.** Рисола аз муқаддима, чор боб, шарҳи адабиёт, маводди таҷрибавӣ, хулоса, рӯйхати манбаъҳо ва натиҷагирии умумӣ иборат аст. Рисола дар 189 саҳифа бо ҳуруфчинии компютерӣ таҳия шуда, 57 расм, 58 ҷадвал ва 133 номгӯи адабиётро дар бар мегирад.

# БОБИ 1. ТАШАКУЛИ СОХТ ВА ХОСИЯТҲОИ ФИЗИКИЮ ХИМИЯВИИ ХҶЛАИ АЛЮМИНИИ БО ҚАЛЪАГӢ, СУРБ ВА ВИСМУТ ЦАВҲАРОНИДАШУДА.

(шарҳи адабиёт)

## 1.1. Сохт ва хосиятҳои хӯлаҳои алюминий бо оҳан, мис, кремний, қалъагӣ, сурб ва висмут

**Сохт ва хосиятҳои хӯлаи алюминий ва оҳан.** Оҳан дар таркиби ҳама навъҳои алюминий вучуд дорад. Оҳан аксаран бинобар истифодаи нодурусти таҷҳизоти пӯлодин ва дар чараёни рехтагарӣ ё омехтани маводди гудохта ба алюминий ворид мегардад. Аммо дар баъзе мавридҳо онро қасдан ба хӯлаҳо илова мекунанд. Масалан, ба хӯлаҳои системаи Al-Cu-Ni — бо мақсади баланд бардоштани муқовимат ба ҳарорати баланд, ба хӯлаҳои навъи магний (бо миқдори ками магний) — барои коҳиши афзоиши ғайримуқаррари донаҳо, ба хӯлаҳои системаи Al-Fe-Ni — чиҳати кам кардани зангзанӣ дар муҳити буғӣ бо ҳарорати баланд ва ба маводди нави ноқилӣ — бо ҳадафи мустаҳкамсозӣ бе коҳиши назарраси қобилияти чараёнгузаронӣ илова карда мешавад [4, 5].

Хӯлаҳои системаи Al-Fe бо ташаккули кластерҳо тавсиф меёбанд, ки ин хусусият аз нуқтаи обшавӣ то тақрибан 50 °C болотар коҳиш меёбад, вақте ки тақсимои атомҳо бетартиб мегардад. Хусусиятҳои термодинамикии гудохтаҳо мавриди омӯзиш қарор гирифтаанд. Дар канори алюминийи системаи Al-Fe эвтектикӣ аз Al + FeAl<sub>3</sub> дар ҳарорати 655 °C ба вучуд меояд ва таркиби эҳтимолии он ба 1,7–2,2% мас. Fe мувофиқ мебошад. Ташаккули ядрохое, ки ба пайдоиши эвтектикаи вайроншуда мусоидат мекунанд, ҷойивазкунии нуқтаи эвтектикро шарҳ медиҳанд ва таъсири ларзиш ин равандро тақвият медиҳад. Марҳилаи асосӣ дар ҳолати кристаллизатсияи эвтектикӣ пайвастигии FeAl<sub>3</sub> мебошад. Қобилияти баланди пластикии эвтектика низ мавриди тадқиқ қарор гирифтааст. Дар ҳарорати эвтектикӣ ҳалшавии оҳан дар алюминийи сахт ба 0,03–0,05% баробар аст ва ин нишондиҳанда дар ҳарорати 427 °C коҳиш меёбад. Ҳангоми обутоб додани маҳлули сершуда аз ҳолати моеъ, ки дорои то

8,4% оҳан аст, атомҳои оҳан ба таври бетартиб ҷойгир шуда, кластерҳоро ба вуҷуд меоранд. Ҳарорати ҳалшавии оҳан дар алюминий ва таъсири Мёссбауэр низ мавриди тадқиқ қарор гирифтааст [6, 7].

Мувозинати фазаи оҳан бо алюминий одатан ба шакли  $\text{FeAl}_3$  (40,7% массаи Fe) ишора мешавад, аммо таҳлили кристаллҳои хӯла нишон дод, ки таркиби онҳо ба пайвастагии  $\text{Fe}_2\text{Al}_7$  (37,3% массаи Fe) наздик буда, сохтори кристалл ба формулаҳои  $\text{Fe}_4\text{Al}_3$  (38,9%) ва  $\text{Fe}_6\text{Al}_9$  (39,5%) мутобиқат мекунад. Фазаи  $\text{FeAl}_3$  аз маҳлули моеъ дар ҳарорати 1147 °C ба вуҷуд меояд ва ин раванд на дар натиҷаи реаксияи перитектикӣ, балки мустақим сурат мегирад. Ин пайвастагӣ дорои шабакаи кристаллии моноклиникӣ мебошад (гурӯҳи фазой  $C2/m$ , бо 100 атом дар ячейкаи воҳидӣ) ва параметрҳои шабака чунинанд:  $a = 1,5487$  нм,  $b = 0,80831$  нм,  $c = 1,2476$  нм,  $\beta = 1,0743$  рад. Хулоса бар он аст, ки ин фаза дорои тамоюли қавӣ ба дучандшавӣ буда, ба сохтори орторомбӣ бо симметрияи баландтар наздик аст [7, 8].

Параметри панҷараи кристалии алюминий то ҳадди ҳалшавии Fe дар алюминийи сахт (0,05% Fe) амалан тағйир намеёбад ва танҳо то 0,4012 нм кам мешавад, агар баъд аз хунукшавӣ то 8,4% массаи Fe дар шакли маҳлули сахт боқӣ монад. Зичӣ аз 2,69 г/см<sup>3</sup> (0% Fe) то 3,77 г/см<sup>3</sup> (36% Fe) тағйир меёбад. Зичии маҳлули моеъ бо 5% Fe дар ҳарорати 777 °C ба 2,502 г/см<sup>3</sup> ва дар 947 °C ба 2,457 г/см<sup>3</sup> баробар аст. Коэффитсиенти васеъшавии хаттӣ бо афзоиши миқдори оҳан коҳиш меёбад, зеро концентратсияи оҳан ба сатҳхое мерасад, ки ба коэффитсиенти ҳаҷмкамшавии пайвастагии  $\text{FeAl}_3$  мутобиқ мебошанд. Камшавии ҳаҷм дар ҳолати кристаллизатсия барои хӯла бо 5% массаи Fe ба таври хаттӣ то тақрибан 3% коҳиш меёбад. Бо афзоиши концентратсияи оҳан, часпнокии гудохтаҳо зиёд мешавад, сатҳи устувории онҳо баланд менамояд ва гармигузаронӣ коҳиш меёбад. Муқовимати барқӣ дар 0,05% Fe тақрибан ба  $2,75 \cdot 10^{-8}$  Ом•м баробар аст ва бо зиёд шудани миқдори Fe то 1% ба  $2,9 \cdot 10^{-8}$  Ом•м мерасад. Дар хӯлаҳои, ки мавриди коркарди термикӣ қарор гирифтаанд, таъсири иловаи ками оҳан ба муқовимати барқӣ камтар зоҳир мешавад.

Коэффитсиенти муқовимати барқӣ  $4,66 \cdot 10^{-12}$  Ом•м/К-ро ташкил медиҳад. Муқовимати электрикии хӯлаҳои аз ҳад сершуда дар ҳароратҳои  $-272$  то  $-268$  °С, инчунин ҷараёнгузарониҳои ғудохтаҳо, тадқиқ шудаанд. Иловаи оҳан хосиятҳои магнитиро андаке тағйир медиҳад. Танҳо оҳани дар маҳлули саҳт ҳалшуда ба т.э.д.с. таъсир мерасонад, бинобар ин камшавии он ночиз мебошад [9-11].

Таъсири манфии оҳан ба хосиятҳои конструксионии алюминий ба мавҷудияти он дар намуди кристанҳои ибтидоӣ ё пайвастагиҳои бузург дар системаи Al-Fe-Si марбут аст, ки ин боиси афзоиши саҳтӣ ва коҳиши пластикии хӯла мегардад [12, 13].

Заррачаҳои дисперсии оҳан ҳангоми деформатсия барорбар паҳн мешаванд. Хӯлаҳои, ки ба воситаи прескунии қатраҳо бо суръати баланди хунуккунӣ ё синтези спекани ҳосил мегарданд, ҳатто дар ҳарорати баланд хосиятҳои баланди механикӣ нишон медиҳанд. Ин хосиятҳо на ба мавҷудияти оҳан дар хӯла, балки ба таъсири зарраҳои оксиди алюминий марбутанд [14].

Хосиятҳои мустаҳкамии баланд ва қобилияти хуби гузарониши хӯлаҳои системаи Al-Fe мавриди тадқиқ қарор гирифтаанд. Модули чандирӣ ва модули лағжиш бо афзоиши миқдори оҳан ба таври хаттӣ меафзоянд: ҳар як фоизи иловагии оҳан модули чандириро тақрибан 25% ва модули лағжишро  $\sim 3\%$  зиёд мекунад. Зариби Пуассон бо афзоиши миқдори оҳан ба таври миёна 0,0023% коҳиш меёбад. Суръати паҳншавии мавҷҳои ултрасадо низ бо зиёд шудани консентратсияи оҳан меафзояд, дар ҳоле ки қобилияти демпферӣ метавонад ҳам зиёд ва ҳам коҳиш ёбад. Иловаи оҳан ҳудуди ҷоришавиро ба таври назаррас боло мебарад, вале ҳудуди ҳастагӣ, махсусан дар мавриди ташаккули кристаллҳои калонҳаҷми  $FeAl_3$ , коҳиш меёбад [15].

Ба шаклҳосилкунии хӯлаҳо андоза ва тақсимои зарраҳои таркибӣ чунин таъсир мерасонад: кафидан ва кандашавӣ дар натиҷаи таъсири кристаллҳои калони  $FeAl_3$ , ки боиси бад шудани шакл ва устувории ҳасташавӣ ба заррачаҳои пайвастагиҳои  $FeAl_6$  чунин таъсир надоранд. Бо зиёд шудани консентратсияи

оҳан, хатари ташаккули сохт кам мешавад; иловаи оҳан то андозае ба беҳтар шудани коркарди алюминий оварда мерасонад [16, 17].

Ба шаклпазирии хӯлаҳо андоза ва тақсимои зарраҳои таркибӣ таъсири назаррас мерасонад: кристалҳои калони  $FeAl_3$  метавонанд боиси кафидан ва кандашавӣ гардида, шаклпазирӣ ва устувории хасташавиро коҳиш диҳанд. Дар муқоиса, зарраҳои пайвастагии  $FeAl_6$  чунин таъсири манфӣ надоранд. Бо зиёд шудани миқдори оҳан, хатари ташаккули сохтори номатлуб коҳиш меёбад. То андозае иловаи оҳан метавонад коркарди алюминийро беҳтар намояд [18].

Константаҳои диффузияи оҳан дар алюминий дар ҳолати сахт дар тадқиқоти [19, 20] тавсиф шудаанд. Равандҳои диффузия ва ташаккули пайвастагиҳо дар чуфтҳои биметаллӣ  $Al-Fe$  мавриди омӯзиш қарор гирифтаанд. Ҳангоми воридшавии оҳан ба алюминий, қабати  $FeAl$  ташаккул меёбад, ки суръати диффузияро коҳиш медиҳад. Дар алюминийи гудохта, диффузия равандҳои ҳалшавии оҳанро идора мекунад, дар ҳоле ки омезиш суръати онро меафзояд. Дар тадқиқоти [19, 20] раванди ғўтонидани оҳан дар алюминийи гудохта низ нишон дода шудааст. Оҳан ба паҳншавии металҳои дигар дар алюминий таъсири чашмрасе намерасонад. Табдили  $FeAl_6$  ба  $FeAl_3$  низ тавассути диффузия, новобаста аз миқдори кремний, бо энергияи фаъолсозии  $Q = 3,23$  эВ сурат мегирад [21, 22].

Донаҷабандии фазаҳои  $FeAl_3$  аз маҳлули сахт дар хӯлаҳое, ки миқдори мувозинати оҳан ( $\sim 0,04\%$ ) доранд, бо суръати паст сурат мегирад ва барои оғоз ёфтани он гармкунии хӯла то ҳарорати  $227-327^\circ C$  ё сахтшавии шадид зарур аст.

**Ҳосилкунии сохтори хӯлаҳои алюминий ва магний.** Магний унсури асосии хӯлаҳои навъи "магнали" мебошад, ки пас аз деформатсияи хунук дар баробари мустаҳками ва чандирӣ боз муқовимат ба зангзанӣ ва қобилияти кафшерии хӯларо баланд мебардорад. Иловаҳои магний ба хӯлаҳои  $Al-Mg_2Si$  дар натиҷаи коркарди термикӣ мустаҳкамии хӯларо зиёд намуда, ба коррозия устуворӣ ва қобилияти кафшерии хӯларо нигоҳ медорад; хӯлаҳои системаи  $Al-Zn-Mg$ , магний ба коррозия устувории баланд, қобилияти хуби кафшерӣ ва

мустаҳкамии баландро таъмин мекунад. Иловаи магний ба хӯлаҳои системаи Al-Cu шиддатнокии сахтшавиро ҳангоми пиршавӣ зиёд мекунад, дар хӯлаҳои системаи Al-Mn онҳо мустаҳкамиро бе талафи муқовимат ба зангзанӣ ё чандирӣ зиёд мекунанд ва ба хӯлаҳои Al-Si қобилияти баланд бардоштани мустаҳкамӣ бо коркарди термикиро таъмини мекунад [23].

Бо зиёд шудани миқдори магний дар маҳлули сахт, муқовимати барқӣ тақрибан ба таври хаттӣ меафзояд ва дар концентратсияи мувофиқ ба маҳлули маҳдуд (17,4% Mg) ба  $10 - 11 \cdot 10^{-8}$  Ом·м мерасад. Деформатсияи хунук муқовимати чараёнро зиёд мекунад, масалан, ҳангоми деформатсия то 60% муқовимати чараёнро то 2–3% зиёд мекунад. Инчунин шуоькунии нейтронӣ низ муқовимати чараёнро зиёд мекунад. Қимати коэффитсиенти ҳарорати муқовимати барқӣ ба таври экспоненсиалӣ то  $2 \cdot 10^{-12}$  Ом·м/К дар таркиби 5% Mg ва то  $1 \cdot 10^{-12}$  Ом·м/К дар 25% Mg паст мешавад. Муқовимати чараён дар ҳарорати 602°C аз  $8,8 - 8$  Ом·м барои алюминийи соф то  $14,5 \cdot 10^{-8}$  Ом·м барои хӯлаи дорои 12% Mg меафзояд. Барои хӯлаи дорои 1% Mg дар ҳарорати гудохташавӣ, чараёнгузарониро дар ҳолати сахт ва моеъ мутаносибан ба  $12 \cdot 10^{-8}$  то  $29 \cdot 10^{-8}$  Ом·м баробар аст [24, 25].

Маълумоти таҷрибавӣ доир ба хосиятҳои механикӣ, химиявӣ ва технологияи хӯлаҳои Al-Mg бо тозагии баланди саноатӣ нишон медиҳанд, ки дар байни онҳо фарқияти назаррас вучуд надорад. Сахтӣ, мустаҳкамӣ ва мустаҳкамии ҳастагӣ зиёд шуда, қобилияти пластикӣ кам мешавад. Хӯлаҳое, ки дар таркибашон зиёда аз 5 - 6% Mg доранд, ба коркарди термикӣ осебпазиранд, ки дар ин ҳолат каме афзоиши хосиятҳо мушоҳида мешавад. Таъсири дараҷаи деформатсия, ҳарорат ва таркиб ба сохтор ва хосиятҳои хӯлаҳои дукомпонента омӯхта шудааст. Дар баробари паст шудани ҳарорат ҳудуди мустаҳкамӣ бо таври назаррас зиёд шуда ҳудуди чоришавӣ ва пластикӣ кам мешавад, дар ин ҳолат қайшии намунаи буридашуда амалан кам намешавад. Шиддати критикии лағжиш аз ҳарорат дар ҳудуди  $(-153 \div -27^{\circ}\text{C})$  вобаста нест, бо паст шудани ҳарорат дар ҳудуди  $(-269 \div -153^{\circ}\text{C})$  зиёд мешавад ва бо пастшавии минбаъдаи

ҳарорат паст мешавад. Камшавии мустаҳками бо баланд шудани ҳарорат нисбат ба дигар хӯлаҳои алюминий каме зиёд мешавад. Мувофиқи кор [26], ин ба ташаккули атмосфераҳои атомҳои магний дар атрофи дислокатсияҳо вобаста аст, ки ҳаракати охирино бозмедорад. Тағйирёбии сохти таркиби ҳангоми ҳастагӣ дар хӯлаҳои системаи Al-Mg ба тағйирёбии сохти таркибии дигар хӯлаҳои алюминий монанд аст. Пеш аз шикастани ҳастагӣ бо саҳтшавии шиддат ва ҳосилшавии кластерҳои дислокатсияҳо, омехташавӣ дар минтақаҳои сарҳадӣ, ки аз ихроҷкуни озод ҳаракат мекунанд, инчунин ташаккули сохти хучайравӣ дар атрофи тарқишҳо ба амал меояд [26-28].

**Сохтор ва хосиятҳои хӯлаҳои системаҳои Al-Si.** Диаграммаи ҳолатии системаи Al-Si ба навъи эвтектикӣ мансуб аст, ки дар он маҳлули саҳти кремний дар алюминий ва маҳлули саҳти алюминий дар кремний дар ҳолати мувозинат қарор доранд. Тамоюли ташаккули кластерҳо дар ҳолати моеъ гузориш дода шудааст [29].

Сардшавии зуд аз ҳолати моеъ маҳлулияти кремнийро то 16% зиёд карда, нуқтаи эвтектикиро ба 17% Si табдил медиҳад (ҷадвали 1.1).

**Ҷадвали 1.1 - Ҳалшавии кремний дар алюминийи саҳт [29]:**

Ҳарорат, °C	577	552	527	477	427	377	327	277	227
% (аз рӯйи масса)	1.65	1.30	1.10	0.70	0.45	0.25	0.10	0.04	0.01
% (атомӣ)	1.58	1.25	1.05	0.67	0.44	0.24	0.10	0.04	0.01

Маълумот дар бораи ҳалшавии алюминий дар кремний дар ҳолати саҳтӣ то андозае муҳолифанд; ки қиматаш аз 0,01% дар 1327°C то ба 1,2% дар 997°C мерасад. Ҳарорати эвтектикии асосан аз ҷониби умум қабулшуда 577°C (ё 576,8°C) – ро ташкил медиҳад, аммо таркиби нуқтаи эвтектикӣ аз 11,7 то 14,5% Si [26]; арзиши қимати эҳтимолӣ ба 12,5% Si баробар аст.

Сохти таркибии хӯлаҳо дар наздикии таркиби эвтектикӣ нисбат ба миқдори кремний дар таркиби хӯла бештар аз суръати хунуккунӣ вобаста аст: сардшавии

босуръат ба ташаккули кремнийи аввалия мусоидат мекунад, дар ҳоле ки хунуккунии сусти миқдори эвтектикиро зиёд мекунад [29]. Сохторе, ки дар натиҷаи доначабандӣ самтнок ба даст омадаанд, таъсири мис ва оҳан ба онҳо ва афзоиши кремний дар субстрати алюминий омӯхта шудаанд [30].

Тағйирёбии ҳаҷм ҳангоми кристаллизатсия бо зиёд шудани миқдори кремний ба таври хаттӣ коҳиш меёбад, ва дар 25% Si қатъ мешавад. Қайшӣ дар ҳарорати доимӣ то расидан ба миқдори маҳдуди ҳалшавии кремний дар алюминий (1,65%) афзоиш ёфта, ба ҳадди максималӣ мерасад. Баъди он, новобаста аз боло рафтани ҳарорати обшавӣ, ҳатто барои хӯлаҳои ғайриэвтектикӣ, қайшӣ коҳиш меёбад [31].

Иловаҳои кремний ба кашидашавии сатҳи алюминий таъсир намерасонанд. Энергияҳо дар сарҳадҳои байнифазагии Al ва Si дар ҳолати саҳт омӯхта шуданд [32].

Потенсиали электроди кремний -0,26 В-ро ташкил медиҳад ва барои хӯлаи дорои 1% Si (ба маҳлули саҳт дохилшаванда) -0,81 В, дар ҳоле ки потенциали алюминий 0,85 В аст [33]. Тафовути калон дар потенциали ин ду фаза бояд ба зангзании зуд оварда расонад. Аммо, кремний дар аксари муҳитҳои зангзананда ғайрифайол аст, аз ин рӯ муқовимат ба зангзании хӯлаҳои кремний ба алюминий баробар ё беҳтар аст, гарчанде ки далелҳо мавҷуданд, ки дар баъзе маҳлулҳои ишқорӣ бо каме паст шудани муқовимат зангзанӣ ба амал меояд. Миқдори ками кремний дар маҳлули саҳт фазолияти кимиёвии хӯларо нисбат ба ҳамон миқдори кремнийе, ки дар шакли фазаи дуввум мавҷуд аст, шадидтар коҳиш медиҳад. Ҳангоми анодизатсияи кислотаи сулфат кремний бо қабати тунуки оксид пӯшида мешавад ва дигар реаксия ба амал намеояд [33, 34].

Ба маълумоти академик А.А. Бочвар [35], шартҳои асосии таъмини муқовимати баланди хӯла ба фишорҳо коҳишёбӣ мавҷудияти миқдори кофии эвтектикӣ (аз 15 то 25%) ё ташкилдиҳандаи дигаре мебошад, ки дар навбати охирин ва дар ҳарорати доимӣ кристалл мешавад. Дар он концентратсияи хӯла,

ки дар оғози кристалбандӣ ҳаҷмкамшавии ҳаттӣ мушоҳида намешавад, яқбора афзоиши муқовимат ба шиддат ба амал меояд. Бо миқдори мувофиқи эвтектикӣ дараҷаи кристалҳои дендритӣ паст шуда, алоқаи сатҳи донаҳо зиёд мешавад. Моеи эвтектикӣ дар ҳарорати доимӣ, яъне бидуни пайдошавии фишорҳои нав кристал мешавад; қобилияти ҳаракати озодонаи онҳоро дар байни меҳвари дендритҳо, таъмин мекунад. Аз ин сабаб тарқишҳое, ки дар ҳӯлаҳои эвтектикӣ пайдо мешаванд, фавран бо моеъ пур мешаванд ва то анҷоми кристаллбандӣ инкишоф намеёбанд [36].

Ҳангоми зиёд шудани миқдори кремний дар он эвтектикаро бо маҳлули саҳти кремний дар алюминий ҳосил мекунад. Дар ҳӯлаҳое, ки 11,7% Si доранд, омехтаи эвтектикаро бо кремний ташкил медиҳад [37].

Дар сохтори ҳӯлаи эвтектикӣ (бо миқдори кремний аз 11,7% зиёд) кристалҳои озоди кремний пайдо мешаванд, ки шумораи онҳо баробари зиёд шудани таркиби он меафзояд. Илова ба мавҷудияти эвтектикӣ дар қолаби рехтагарӣ зери фишор, тағйирпазирии пластикии ҳӯла аз ҳарорати саҳтшавии он поён аҳамияти калон дорад. Дар ҷадвали 1.2 хосиятҳои механикии ду ҳӯлаи алюминий дар ҳарорати баланд нишон дода шудаанд. Онҳо нишон медиҳанд, ки дарозшавии нисбии ҳӯлаҳои алюминий ва кремний бо зиёдшавии ҳарорат хеле зиёд мешавад [38].

**Ҷадвали 1.2** - Хосиятҳои механикии ҳӯлаҳои алюминий дар ҳарорати баланд [38]:

Ҳарорат, °C	Ҳӯла Al+8%Si		Ҳӯла Al+12%Si	
	Ҳадди мустаҳкамӣ, кг/мм <sup>2</sup>	дарозшавӣ, %	Ҳадди мустаҳкамӣ, кг/мм <sup>2</sup>	дарозшавӣ, %
25	15.3	1	18.6	8.0
100	14.8	-	16.8	10.5
150	13.9	-	13.4	12.8
200	12.3	-	10.1	13.0
250	11.4	-	7.7	15.0
300	7.7	2.5	5.5	21.5

Қимати дарозшавӣ ба хӯлаи  $Al + 12\% Si$ , ки дар қолаби қумӣ бо иловаи элементҳои чавҳарӣ рехташудааст, тааллуқ дорад. Ҳангоми рехтагарӣ дар зери фишор дарозшавӣ дар ҳарорати паст каме камтар мешавад. Омезиши миқдори зиёди эвтектикӣ бо хосияти пластикии баланд дар ҳарорати баланд дар хӯлаҳои алюминий бо кремний (масалан силумин) ин хӯлаҳоро ба тарқишҳои гарм ва хунук бетағйир мегардонад [39, 40].

Хӯлаҳои системаи алюминий – кремний, ки дар таркибашон 4,5% кремний доранд, дар ҳолати гарми қобилияти баланди пластикӣ пайдо мекунад. Агар дар таркиби хӯлаҳои алюминий – мис аз 1 то 3,5 %-и масса кремний илова намоем, дар ҳама ҳолатҳо хосияти пластикии хӯларо беҳтар мекунад. Кремний хосиятҳои рехтагари хӯлаҳои алюминийро хуб мекунад, моеияти ҷоришавии онҳоро зиёд мекунад ва фурӯрагии хӯларо коҳиш медиҳад.

Моеияти ҷоришавии хӯлаҳои алюминий ва кремний ҳангоми зиёд шудани миқдори кремний зиёд шуда, дар наздикии нуқтаи эвтектикӣ (11,7% Si) ба ҳадди максималӣ мерасад. Хӯлаҳои алюминий ва кремний одатан, ҳангоми иҷрои корҳои рехтагарӣ дар қолабҳои якмаротиба истифодашаванди қумию гилӣ, сохти сӯзаншакли кристалҳои калон ҳосил мешавад, ки дар натиҷа ин кристалҳо хосиятҳои механикии хӯларо паст мекунад [41].

Усули асосии беҳтар кардани хосиятҳои механикии хӯлаҳо тағйир додани сохтори онҳо, яъне бо истифода аз реагентҳои кимиёвӣ (натрий ё фторидҳои металлҳои ишқорӣ) такмил додани сохтор мебошад. Дар қолаби рехтагари зери фишор хӯлаҳои модификатсияшуда истифода намешавад, зеро бинобар сабаби дар дохили қолаб ё оташдон зиёд нигоҳ доштани хӯла модификатор таъсири худро гум мекунад — демодификатсия ба амал меояд; ба ғайр аз ин, ҳангоми дар қолаб ба металл фишор овардан ва зуд хунук кардани он миқдори зиёди марказҳои дончабанди пайдо мешаванд ва  $Si$ ,  $FeAl_3$  ва  $\beta$  (Fe-Si) барои ба андозаи сӯзан ё пластинка калон шудан, вақт надоранд; дар натиҷа, устуворӣ ва сахтии силумин зиёд мешавад. Модификатор дар баробари зиёд кардани устувории хӯла, дар як вақт дарозшавии нисбии онро зиёд мекунад; ҳангоми

рехтагарӣ дар зери фишор дарозшавӣ одатан, паст мешавад ва аз 1,5 то 3,0% барои силумин ташкил медиҳад [42, 43].

**Сохтор ва хосиятҳои хӯлаҳои алюминий бо мис.** Хӯлаҳои алюминий - мис, бо вучуди хосиятҳои баланди рехтагарӣ доштанишон, дар усули рехтагарӣ дар зери фишор мувофиқ нестанд, чунки дар натиҷаи рехтагарӣ дар зери фишор тарқишҳо бавучуд меоянд. Аз ин хӯлаҳо қисмҳои мураккаби миёна дар қолибҳои металлӣ рехта мешаванд ва дар таркиби онҳо холигии калон пайдо намешавад.

Дар хӯлаҳои силумин, ки дорои миқдори зиёди кремний мебошанд, таъсири мис (то 0,8%) дар баланд шудани ҳудуди чандирӣ, мустаҳкамӣ ва саҳтӣ хизмат мекунад; бо афзоиши минбаъдаи таркиби мис, арзиши тобоварӣ ва чандирии он кам мешавад. Дарозшавиаш бо иловаи мис (аллакай дар 0,4%) тадриҷан кам мешавад. Дар таркиби хӯлаҳое, ки то 7% Si мавҷуд аст, мис бо миқдори 1,0 - 2,0% тозагии сатҳи рехтаҳое, ки дар зери фишор бадаст оварда шудаанд, беҳтар мекунад. Дар таркиби силумин то 0,8% Cu илова кардан ҳангоми рехтани қисмҳое, ки дар шароити ларзиш ва бори динамикӣ кор кардан пешбинӣ шудаанд, амалӣ карда мешавад. Мис дар силумин муқовимат ба зангзании онро коҳиш медиҳад [44, 45]. Дар ҷадвали 1.3 ҳалшавии мис ва кремний дар алюминий нишон дода шудааст

**Ҷадвали 1.3** – Ҳалшавандагии мис ва кремний дар маҳлули саҳти алюминий [44]:

Ҳалшавандагӣ, %	Ҳарорат, °C				
	525	500	450	400	300
Мис	4.9	4.18	2.60	1.50	0.40
Кремний	1.1	0.82	0.40	0.20	0.10

**Сохтор ва хосиятҳои хӯлаҳои алюминий бо қалъагӣ.** Қалъагӣ ҳамчун яке аз элементҳои лигари дуюмдараҷа дар хӯлаҳои алюминий ба ҳисоб меравад, зеро он моеъчоришавии хӯлаҳои рехтагариро беҳтару хубтар

менамояд. Айни замон, барои истехсоли подшипникҳо аз хӯлаҳои истифода мешавад, ки дар таркиби онҳо қалбағӣ мавҷуд аст. Нуқтаи эвтектикӣ ( $228-229^{\circ}\text{C}$  бо  $99,5\% \text{ Sn}$ ) аз ҷиҳати таркиб ва ҳарорати обшавӣ ба қалбағӣ хеле наздик аст. Ҳалшавии қалбағӣ дар алюминий дар ҳарорати тақрибан  $627^{\circ}\text{C}$   $0,10\%$ -ро ташкил медиҳад, ки дар ҳарорати эвтектикӣ то  $0,05-0,07\%$  ва дар ҳароратҳои пасттар боз ҳам камтар мегардад. Иловаи Sn ба маҳлули сахт то  $1 \text{ мас.}\%$  ҳангоми хунуккунии маҳлул аз ҳолати моеъ ва то  $5 \text{ мас.}\%$  бо роҳи фурӯнишондани буғӣ имконпазир аст. Хусусиятҳои термодинамикии хӯлаҳо, равандҳои электролизи гудохтаҳо, инчунин ядрошавӣ ва сегрегатсия ҳангоми кристаллизатсия мавриди омӯзиш қарор гирифтаанд [46, 47].

Даври панҷараи кристаллӣ бо зиёд шудани миқдори қалбағӣ меафзояд: дар таркиби  $0,098 \text{ мас.}\% \text{ Sn}$  то  $0,4049 \text{ нм}$  ва барои хӯлаи сахтшуда бо  $1,1 \%$  масса Sn дар маҳлули сахт то  $0,4050 \text{ нм}$  мерасад. Ҳар  $0,1\%$ -и массаи қалбағӣ зичии хӯларо тақрибан  $0,06\%$  зиёд менамояд. Қобилияти гармиғунҷоиши хоси хӯлаҳо дар ҳолати моеъ бо суръат боло меравад ва дар таркиби тақрибан  $20 \text{ мас.}\% \text{ Sn}$  ба ҳадди максималии  $37 \text{ кҶ/мол}$  мерасад, пасон якбора то  $28 \text{ кҶ/мол}$  коҳиш меёбад, ки ба арзиши хоси қалбағии холис мутобиқ аст.

Шиддати сатҳи хӯлаҳо дар интерфейси моеъ–газ ва таносуби шиддат дар марзи сахт–моеъ нисбат ба сахт–сахт коҳиш меёбад, ки ба шакл ва морфологияи ҷузъҳои фаза таъсир мерасонад. Моеънокии хӯлаҳо паст мешавад ва бо он якҷо ҷараёнгузаронӣ низ коҳиш меёбад.

Коэффитсиенти муқовимати ҳароратии электрикӣ дар таркиби  $10 \text{ мас.}\% \text{ Sn}$  ба ҳадди пасттарини худ,  $2,5 \times 10^{-12} \text{ Ом}\cdot\text{м/К}$  мерасад ва баъдан тадриҷан то  $3,4 \times 10^{-12} \text{ Ом}\cdot\text{м/К}$  афзоиш меёбад, ки ба арзиши қалбағии холис наздик аст. Муқовимати хоси электрикии хӯла дар ҳолати моеъ дар ҳарорати  $414^{\circ}\text{C}$  аз  $27 \times 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$  (барои алюминийи соф) то  $60 \times 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$  (барои қалбағии соф) тақрибан ба таври хаттӣ зиёд мешавад.

Илова намудани қалбағӣ ба таркиби алюминийи аълосифат ба афзоиши мустаҳкамии он мусоидат мекунад, аммо дар алюминийи техникӣ тағйироти

назаррасе дар арзишҳои сахтӣ, мустаҳкамӣ ва дарозшавии нисбӣ ба миён намеояд. Ин хосиятҳо вобаста ба ҳарорат ба таври якбора коҳиш меёбанд. Барои хӯлаҳои, ки дорои 10% қалбағӣ мебошанд, дар ҳарорати 227°C мустаҳкамӣ ду баробар кам мешавад, дар ҳоле ки дар ҳарорати муқаррарӣ дарозшавии нисбӣ аз 60% то 5% коҳиш меёбад. Хӯлаҳо дар ҳарорати 627°C низ зудшикан мешаванд. Хосиятҳо ин хӯлаҳоро бо роҳи деформатсияи пластикӣ, ки фазаҳои қалбағиро вайрон мекунад ва баъдан бозпӯхт карда мешаванд, баланд бардоштан мумкин аст [48, 49].

Маълум аст, ки камшавии потенциали электродӣ то -1,8 В дар ҳолест, ки потенциали қалбағӣ -0,49 В ва потенциали алюминий -0,85 В мебошад. Ин нишон медиҳад, ки қалбағӣ нисбат ба алюминий дорои потенциали электродии пасттар аст, ки метавонад боиси тағйирёбии раванди анодӣ ва таъсири он ба хосиятҳои электрохимиявии хӯла гардад. Иловаҳои қалбағӣ муқовимати зангзаниро дар маҳлулҳои ишқорӣ ва турш коҳиш медиҳанд. Питинг ҳосилкунӣ дар маҳлулҳо барои анод кардан омӯхта шудааст.

Самаранокии алюминийе, ки бо қалбағӣ модификатсия шудааст кам аст. Ҳангоми пиршавӣ, хӯлаҳои дукомпонентӣ танҳо то андозае мустаҳкам мешаванд, аммо равандҳои таҷзия ва ташаккули фазаҳо ба раванди муқаррарии хӯлаҳои дигар системаҳо шабоҳат доранд. Фазаи мобайнӣ дорои панҷараи тетрагонӣ буда, ченакҳояш:  $a = 0,592$  нм ва  $b = 0,323$  нм-ро ташкил медиҳанд. Муносибати ориентатсия байни ин фаза ва матритсаи алюминий чунин аст, ки қалбағӣ дар миқдори 0,05–0,1% масса метавонад ба раванди сахтшавии пиршавии хӯлаҳои системаи Al-Cu таъсири назаррас расонад [50].

**Сохторҳосилкунии хӯлаҳои алюминий бо иловаи сурб.** Бо мақсади беҳтар кардани қобилияти коркард тавассути буриш бо асбобҳои теғадор, ба баъзе навъҳои хӯлаҳои алюминий миқдорӣ муайяни сурб илова карда мешавад. Иловаи ҳамзамон ва висмут ба гудохта имкон медиҳад, ки тағйироти ҳаҷмии ин элементҳо то ҳадде маҳдуд карда шавад, ки аз пайдоиши тарқишҳо ва баромадани массаи моеъ ба сатҳи хӯла ҷилавгирӣ намояд [51, 52].

Дар системаи Al–Pb минтакаи мавҷуд аст, ки дар ҳолати моеъ омехта намешавад. Нуқтаи монотектикӣ дар концентратсияи 1,5 %- масса Pb ва ҳарорати 658,3 °C ҷойгир буда, ин минтақа то 99,85% - масса Pb тӯл мекашад. Ҳалшавии сурб дар алюминийи моеъ вобаста ба ҳарорат афзоиш меёбад: дар 827 °C то ~4,5 % - масса, дар 1227 °C то ~26 % - масса ва нуқтаи критикӣ дар 93 % - масса Pb ва 1427 °C ба қайд гирифта шудааст. Дар ҳолати сахт ҳалшавии сурб хеле маҳдуд буда, дар ҳарорати монотектикӣ ~0,15–0,20 мас.% ва бо паст шудани ҳарорат боз ҳам камтар мешавад. Нуқтаи эвтектикӣ аз тарафи сурб ба 99,99 % - масса Pb ва 327 °C рост меояд. Ҳалшавии алюминий дар сурби сахт ниҳоят кам аст [53].

Коркарди ултрасадо дар ҳолати моеи хӯлаҳо ба ташаккули сохтори қабат-қабат ба таври назаррас мусоидат мекунад. Ин таъсир дар марҳилаи доначабандӣ низ идома ёфта, ҳатто пас аз обшавии такрорӣ низ нигоҳ дошта мешавад. Коркарди ултрасадо боиси беҳтар шудани тақсимооти компонентҳо ва ташаккули сохтори якхела мегардад [54].

Бо илова шудани сурб ба хӯлаи алюминий, даври панҷараи кристаллӣ каме коҳиш ёфта, барои хӯлаи дорои 0,13%-и масса Pb ба 0,40488 нм мерасад. Шиддати сатҳӣ коҳиш ёфта, моеият зиёд мегардад. Муқовимати электрикии хӯлаҳои сахтшуда то  $2,77 \cdot 10^{-8}$  Ом•м зиёд мешавад, ки ба ҳадди ҳалшавандагии сурб мувофиқ аст ва баъдан бо афзоиши то 20%-и масса Pb тағйир намеёбад. Иловаҳои хурди сурб ба алюминийи гудохта таъсири кам ба муқовимати электрикӣ доранд. Дар ҳудуди ҳалшавӣ, сурб сахтиро каме зиёд мекунад, аммо афзоиши минбаъда баръакс ба коҳиши сахтӣ оварда мерасонад. Хӯлаҳо бо иловаи сурб ба зангзанӣ муқовимати баланд доранд, ки ин ба шиддати электродии баландтари сурб марбут аст [55].

**Сохтор ва хосиятҳои хӯлаи алюминий бо висмут.** Алюминий ва висмут дар ҳолати моеъ ҳалшавандагии маҳдуд доранд. Дар солҳои охир хосиятҳои хӯлаи мазкур якҷанд маротиба омӯхта шуд, аммо натиҷаҳо каме фарқ мекунанд. Ҳалшавии висмут дар алюминийи сахт дар 0,2 мас.% хело кам буда,

дар ҳарорати монотектикӣ аз садякӣ ҳам кам мешавад ва дар ҳарорати 527°C то ба қадри кофӣ кам мешавад. Дар адабиёт [56, 57] тағйироти параметрҳои панҷараи кристаллии алюминий дар натиҷаи иловаи элементҳои лигарӣ нишондода шудаанд. Хусусиятҳои термодинамикии ҳӯла низ мавриди омӯзиш қарор гирифта, вобастагии онҳо аз таркиб ва ҳарорат муайян карда шудааст [58].

Муқовимати хоси чараёнгузаронии алюминий дар ҳолати сахт бо ҳар як фоизи висмут тақрибан  $1,3 \cdot 10^{-8}$  Ом·м зиёд мегардад, дар ҳоле ки коэффитсиенти ҳароратии муқовимати барқӣ каме коҳиш меёбад. Дар ҳолати моеъ бошад, тағйироти назаррас мушоҳида намешавад. Ҳангоми илова кардани 5–6% Вi, шиддати сатҳии алюминий дар вақти кашиш ба таври назаррас коҳиш ёфта, ба тақрибан нисфи арзиши алюминийи тоза мерасад; ҳамин тавр, моеъчоришавӣ низ афзоиш меёбад [59].

Ҳангоми илова кардани миқдори ками висмут (<0,2%) ба таркиби алюминий, хосиятҳои механикии ҳӯла то андозае беҳтар мешаванд. Аммо, бо зиёд шудани миқдори висмут, хосиятҳои механикӣ ба таври назаррас коҳиш меёбанд. Ҳӯлаҳои алюминий висмут бо пиршавӣ мустаҳкам намешаванд, балки майл ба коҳиши мустаҳкамӣ мекунанд. Потенсиали электродии чунин ҳӯлаҳо дар концентратсияи 4,5% Вi тақрибан ба -1,3 В мерасад, ки боиси коҳиши муқовимат ба зангзанӣ мегардад. Висмут бештар бо мақсади беҳтар кардани коркарди механикӣ тавассути асбобҳои теғадор ба ҳӯлаҳои алюминий илова карда мешавад [60].

## **1.2. Хосиятҳои физикии алюминий, оҳан, магний, кремний, мис ва ҳӯлаи алюминийи AlFe<sub>2.18</sub> бо қалъагӣ, сурб ва висмут чавҳаронидашуда**

Хусусиятҳои гармофизикии алюминий. Алюминий дар фишори муқаррарӣ то ҳарорати гудозиш ( $T_m = 933,61$  К) дорои сохтори кристаллии кубии рӯяхояш марказонидашуда (ГЦК) мебошад, ки дар ҳарорати 298 К даври панҷараи он ба  $a = 0,40496$  нм баробар аст [61].

Маълумот оид ба гармиғунҷоиши алюминий дар адабиёти [62 - 64] пешниҳод шудааст. Қимати гармиғунҷоиш, баъди гузаштан аз қимати классикии  $3R$  дар минтақаи  $\theta_D^0$ , бо наздикшавӣ ба ҳарорати обшавӣ тадричан афзоиш ёфта, нисбат ба зергурӯҳи қаблӣ каме шиддатноктар мешавад. Дар нуқтаи наздик ба обшавӣ як ҷаҳиши ночиз мушоҳида мешавад ва нисбати  $C_p^*/3R$  ба 1.23 баробар мегардад. Коэффитсиенти гармиғунҷоиши электрони алюминий  $e = 1,35$  мҶ/(мол·К<sup>2</sup>)-ро ташкил медиҳад.

**Ҷадвали 1.4** – Хусусиятҳои гармофизикии алюминий [62]:

Ҳарорат К	D, Г/см <sup>3</sup>	C <sub>p</sub> , Ҷ/(кг·К)	$\alpha \cdot 10^4$ , м <sup>2</sup> /с	$\lambda$ , Вт(м·К) <sup>2</sup>	$\rho \cdot 10^8$ , Ом·м <sup>3</sup>	L/L <sub>0</sub>
50	-	-	358*	1350	0.0478/0.0476	-
100	2.727	483.6	228*	300.4/302	0.442/0.440	-
200	2.715	800.2	109*	236.8/237	1.587/1.584	0.77
300	2.697	903.7	93.8	235.9/237	2.733/2.733	0.88
400	2.675	951.3	93.6	238.2/240	3.866/3.874	0.94
500	2.665	991.8	88.8	234.7/236	4.995/5.020	0.96
600	2.652	1036.7	83.7	230.1/230	6.130/6.122	0.95
700	2.626	1090.2	78.4	224.4/225	7.350/7.22	0.96
800	2.595	1153.8	73.6	220.4/218	8.700/8.614	0.97
900	2.560	1228.2	69.2	217.6/210	10.18/10.005	0.99
933,61 <sub>s</sub>	2.550* <sup>1</sup>	1255.8	68.0* <sup>1</sup>	217.7* <sup>1</sup> /208* <sup>1</sup>	10.74* <sup>1</sup> /10.565* <sup>2</sup>	1.0* <sup>1</sup>
933,61 <sub>l</sub>	2.368	1176.7	35.2* <sup>1</sup>	98.1-	-24.77	1.06
1000	2.350	1176.7	36.4* <sup>1</sup>	100.6-	-25.88	1.06
1200	2.290	1176.7	39.5* <sup>1</sup>	106.4-	-28.95	1.04
1400	-	1176.7	42.4* <sup>1</sup>	-	-31.77	-

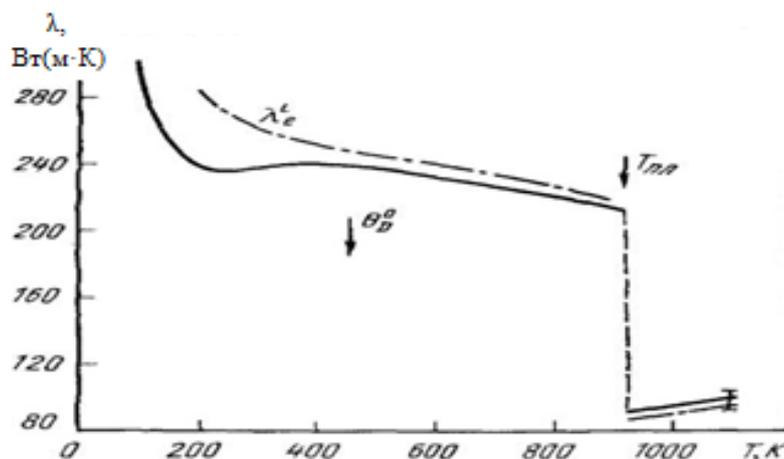
\*<sup>1</sup>Маълумот тавзеҳот талаб мекунад.

\*<sup>2</sup> Сурат – маълумоое, ки аз ҳосили зарби  $\lambda = \alpha c_p$  гирифта шудааст, маҳраҷ – маълумоти тавсияшуда [62].

\*<sup>3</sup> Сурат – маълумоте, ки дар адабиёт [62] тавсия шудааст, барои васеъшавии гармӣ танзим нашудаанд.

Коэффитсиенти гармигузаронии алюминий дар ҳолати сахт (аз 150 К боло) бо коэффитсиенти манфии ҳарорат тавсиф мешавад, яъне бо зиёд шудани ҳарорат, гармигузаронӣ коҳиш меёбад. Баръакс, дар фазаи моеъ коэффитсиенти

гармигузаронӣ бо ҳарорат мусбат аст — бо баланд шудани ҳарорат, гармигузаронӣ меафзояд.



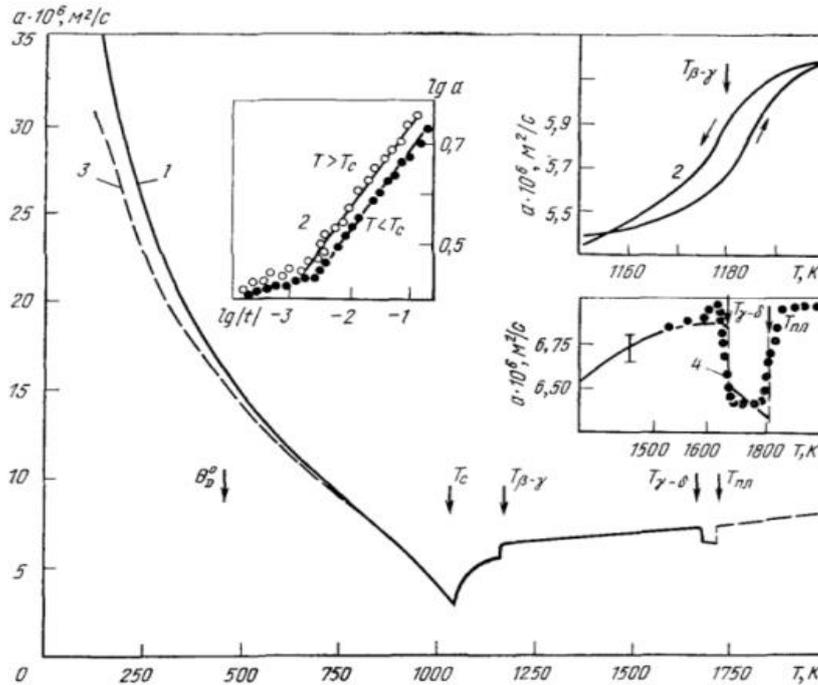
**Расми 1.1** - Вобастагии коэффитсиенти гармигузаронии ( $\lambda$ ) алюминий аз ҳарорат [62].

Гармигузаронии баланди алюминий дар ҳар ду фаза — ҳам сахт ва ҳам моеъ — асосан тавассути чузъи электронии он таъмин мешавад (расми 1.1). Барои намуна, дар ҳолати сахт бо муқовимати барқии  $\rho_p = 1600$ , ҳиссаи гармигузаронии панҷарагӣ дар 800 К аз 2% зиёд намешавад. Ин қимат аз ҳатоҳои ҳисобӣ, ки тақрибан 5% мебошанд, ҳам пасттар аст, ки нишон медиҳад нақши электронҳо дар гармигузаронӣ бартарӣ дорад [63].

**Хосиятҳои гармофизикаи оҳан.** Дар ҳарорати муқаррарӣ, то 1183 К, оҳан дорои сохти панҷараи кристаллии кубии мутамарказ (ОЦК) бо даври  $a = 0,28664$  нм мебошад. Дар поён аз нуқтаи Кюри ( $1042 \pm 0,5$  К) [63] ин тағиротро  $\alpha$ -Fe ва дар минтақаи парамагнитӣ то 1183 К  $\beta$ -Fe номидан мумкин аст. ;  $\gamma$ -Fe дорои панҷараи кристаллии кубии рӯяҳош марказонидашуда (ГЦК) бо даври  $a = 0,36468$  нм дар ҳарорати 1189 К. Гузариши  $\gamma$ - $\delta$  ҳангоми 1667 К ба амал меояд;  $\delta$ -Fe дорои панҷараи кристаллии кубии мутамарказ (ОЦК) бо даври  $a = 0,29322$  нм,  $T_m = 1811$  К мешавад [63].

Қобилияти гармигузаронии оҳан хеле хуб омӯхта шудааст [63]. Дар расми 1.2 ва дар ҷадвали 1.2 натиҷаҳои ҷамъбастшуда [63] нишон дода шудаанд. Дар

наздикии ҳарорати  $T_c$  ва ҷаҳишҳо ҳангоми гузаришҳои сохтори ва обшавӣ дида мешавад. Барои ҳолати моеъ  $C_p^{жс} / 3R = 1,83$ . Намуди аномалияи гармигунҷоиши критикӣ, ки дар расми 1.2 нишон дода шудааст, ба  $\lambda$ -аномалияи шакли  $C_p \sim IT - T_c I^{-a}$  мувофиқат мекунад, ки дар он индекси критикӣ  $a = 0,120 \pm 0,01$  муайян шудааст [63].



**Расми 1.2** – Вобастагии коэффитсиенти гармигунҷоиши ( $\alpha$ ) оҳан аз ҳарорат.

Гармигузаронии оҳан (расми 1.2) коэффитсиенти калони манфии ҳароратро то нуқтаи Кюри, ҳади ақал дар наздикии  $T_c$  ва ҳангоми гузариши  $\beta$ - $\gamma$  ва  $\gamma$ - $\delta$  тағйироти хос дорад. Аномалияи гармигузаронӣ дар наздикии  $T_c$  бо муодилаи зерин тавсиф карда мешавад

$$\alpha = A | \tau |^{\gamma-\alpha} \sim A | \tau |,$$

Ҳатоии муайянкунӣ, ки дар расм 1.2 ва дар ҷадвал 1.2. нишон дода шудаанд, қиматҳои тақрибан 4-5% то 1600 К ва тақрибан 10% дар ҳарорати баландтар оварда шудааст [63].

Гармигузаронии оҳан дар ҳудуди 100-1042 К коэффитсиенти манфии ҳарорат дорад. Дар наздикии нуқтаи Кюри  $X(T)$  оҳан гармигузаронии хело кам [63-65] дошта шакли он каме равшанӣ талаб мекунад. Ҳангоми гузариши  $\beta$ — $\gamma$

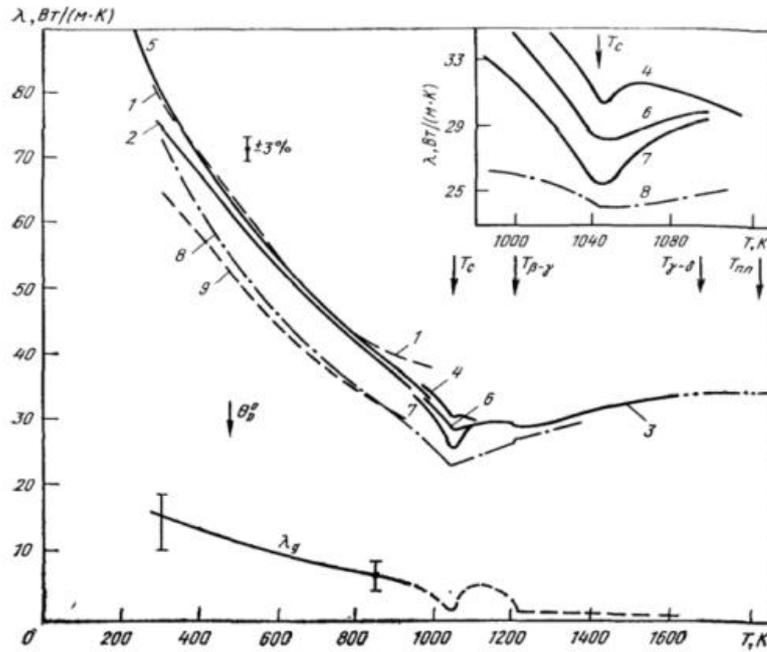
тағйироти заифи гармиғунҷоиш ба мушоҳида мерасад, ки бо тағйироти сохтори кристаллӣ алоқаманд аст. Инчунин дар ҳамин шароит гузариши  $\gamma\text{—}\delta$  низ сурат мегирад, ки ба афзоиши минбаъдаи ҳарорат мувофиқат мекунад.

**Ҷадвали 1.5** – Хусусиятҳои гармофизикаи оҳан [19]:

T, K	d, г/см <sup>8</sup>	C <sub>p</sub> , Ҷ/(кг·К)		$\alpha \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с	$\lambda$ , $\frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$	$\rho \cdot 10^8$ , Ом·м	L <sub>1</sub> /L <sub>0</sub>
		[2]	[2]				
100	-	-	216.1	-	-	-	-
200	-	-	385.0	30.9	-	5.1	-
300	7.87	447	450.0	22.7	79.9	10.2	1.11
400	7.84	489	491.1	18.1	69.4	16.4	1.16
500	7.81	531	530.7	14.9	61.8	24.2	1.22
600	7.77	572	573.1	12.4	55.1	33.5	1.25
700	7.73	618	619.9	10.2	48.7	44.8	1.27
800	7.70	678	679.1	8.18	42.7	58.6	1.27
900	7.66	770	772.8	6.30	37.2	74.0	1.24
1000	7.62	1034	975.1	4.06	32.0	91.4	1.19
1042 <sub>T</sub>	7.61 <sup>*1</sup>	1236 <sup>*1</sup>	1409.0 <sup>*1</sup>	2.71 <sup>*1</sup>	25.4 <sup>*1</sup>	102.2	1.01 <sup>*1</sup>
1100	7.59	829	794.1	4.80	30.2	106.5	1.19
1183 <sub>A</sub>	-	742 <sup>*1</sup>	716.2	5.40 <sup>*1</sup>	30.0	111.0 <sup>*1</sup>	1.12
1200	-	607 <sup>*1</sup>	604.8	6.10 <sup>*1</sup>	29.0	109.0 <sup>*1</sup>	1.09
1300	-	608	607.1	6.20	29.0	111.9	1.10
1400	-	638	640.1	6.60	31.5	117.2	1.07
1600	-	667	673.8	6.90 <sup>*1</sup>	34.1 <sup>*1</sup>	122	1.06 <sup>*1</sup>
1667 <sub>β</sub>	-	679	685.1	6.90 <sup>*1</sup>	34.1 <sup>*1</sup>	-	-
1667 <sub>γ</sub>	-	737	723.4	6.50 <sup>*1</sup>	35.1 <sup>*1</sup>	-	-
1800	-	760	799.5	6.40	35	-	-
1810 <sub>s</sub>	-	762	805.8	6.40 <sup>*1</sup>	35 <sup>*1</sup>	130	1.02
1810 <sub>i</sub>	7.04 <sup>*2</sup>	825	834.9	6.8 <sup>*1</sup>	39 <sup>*1</sup>	133	1.1 <sup>*1</sup>
200	-	825	835.0	-	-	138	-

Эзоҳ:  $\gamma_e = (4.942 \pm 0.11)$  мҶ/(Моль·К<sup>2</sup>):  $\Theta_D^0 = 465 \pm 3$  К [63].

$T_c = 1043$  К,  $C_p T \cdot T_c = 1498,99$ Ҷ/(моль К<sup>2</sup>)<sup>\*1</sup> Маълумот равшанро талаб мекунад. <sup>\*2</sup> Маълумот аз адабиёт [19].



**Расми 1.3** - Вобастагии коэффитсиенти гармигузаронии ( $\lambda$ ) оҳан аз харорат [63-65].

Дар ҷадвали 1.2 хатоии муайянкунии умумишуда чунин ҷамъбаст шудааст: 2% дар диапазони 300 то 800 К; 5% — дар ҳароратҳои аз 800 К боло ва то 10% — дар наздикии нуқтаи  $T_c$ . Аз 700 К поён арзиши  $\lambda_e^g$ , ки бо формулаи  $\lambda_e^g = X - X_{g1}$  ё  $\lambda_e^g = L_0 T / \rho$  ҳисоб мешавад, ба таври назаррас коҳиш меёбад (нигаред ба расми 1.3). Дар натиҷа, дар ҳароратҳои аз 700 К поён функсияи Лорентсии оҳан аз қимати стандартии  $L_0$  паст мешавад. Қачхаттаи 1 ба таносуби  $[(\lambda - \lambda_g) \nu \rho] / (L_0 T)$  мувофиқ аст. Дар ҳароратҳои беш аз 800 К,  $L > L_0$  ва фарқи  $(L - L_0) / L_0$  аз 15% зиёд намешавад. Ин афзоиш эҳтимолан ба парокандашавии бандҳои s-d марбут аст. Қачхаттаи 4 (расми 1.3) натиҷаҳои ҳисобҳои Колквит [65]-ро дар асоси модели думинтақои энергетикӣ нишон медиҳад. Дар ҳароратҳои беш аз 900 К,  $L$  дигар ба, бузургҳои ҳисобшудаи  $L(T)$  мувофиқат намекунад ва ба  $L_0$  наздик мешавад, ки ин нишондоди парокандашавии чандири электронҳо дар минтақои парамагнитӣ мебошад. Аз 700 К поён инҳирофи  $L$  аз  $L_0$  ба ду намуди парокандашавии ғайриэластикӣ вобаста аст: парокандашавии электрон-фонон, ки асосан дар ҳароратҳои поёнтар аз 300 К ҷой дорад (қачхаттаи 2), ва парокандашавии электрон-

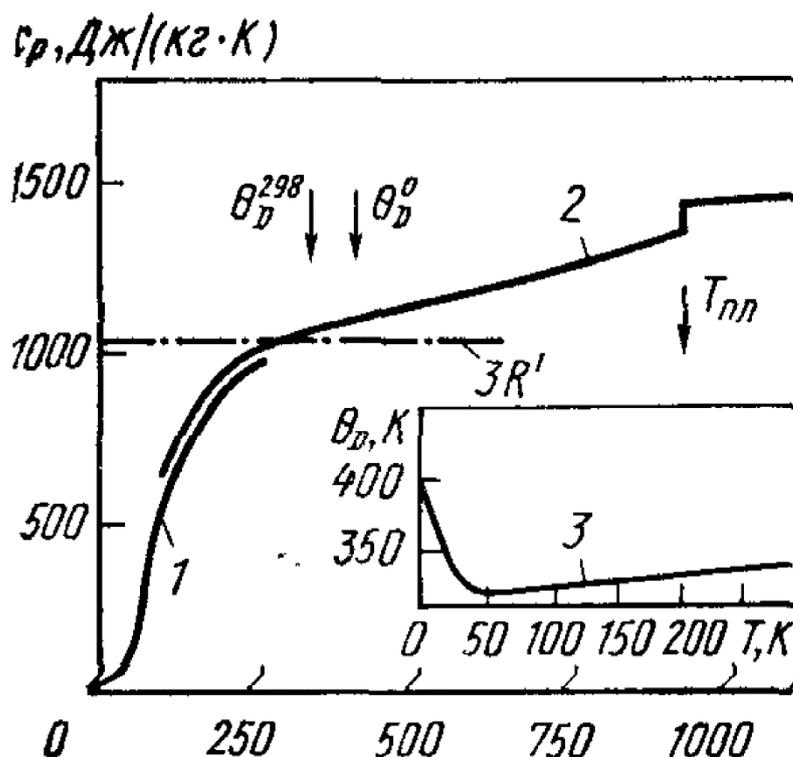
электронӣ, ки аз ҳамтаъсирии s-электронҳо дар минтақаҳои магнитии локалӣ (каҷхатаи 3) ба вучуд меояд.

**Гармиғунҷоиши магний.** Магний дар ҳарорати муқаррарӣ то ҳарорати ғудозиш  $T_{пл} = 923$  К панҷараи кристаллии гексогоналии зич барбасташуда (ГПУ) дошта сохт ва даври он:  $a = 0,32094$  нм ва  $b = 0,52103$  нм дар ҳарорати 298 К баробар аст [65].

Дар расми 1.4 вобастагии гармиғунҷоишӣ хоси ( $C_p$ ) магний аз ҳарорат нишон дода шудааст.

**Гармиғунҷоиши кремний.** Гармиғунҷоиши кремнийи сахт дар ҳудуди ҳарорат аз 1,2 К то нуқтаи обшавии 1690 К чен карда шудааст [66].

Бо истифода аз усули дифференсиалии сканеркунии калориметрия муаллифон [67] оид ба омӯзиши гармиғунҷоиши хоси кремнийи монокристаллӣ натиҷаҳо ба даст овардаанд.



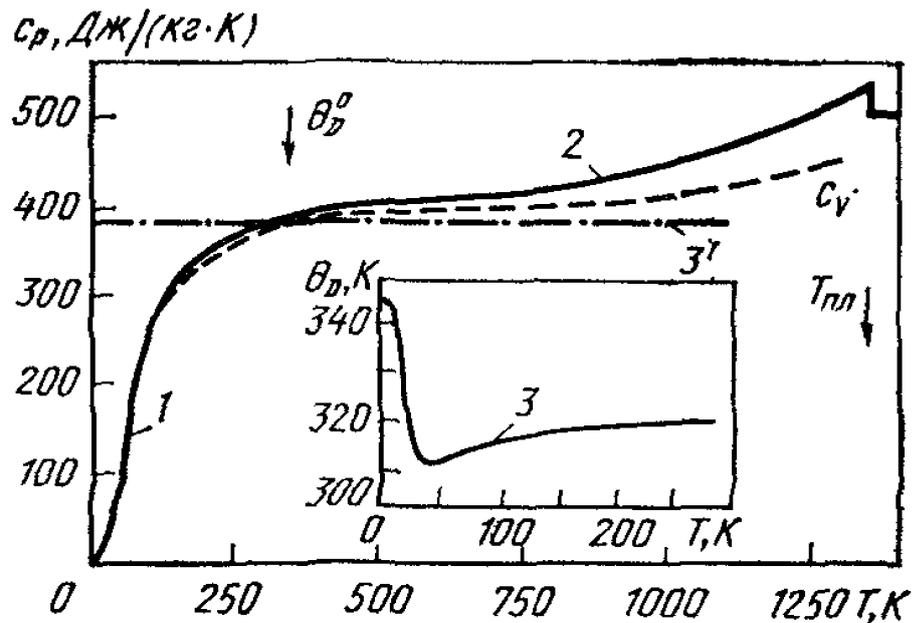
**Расми 1.4** – Вобастагии гармиғунҷоиши хоси ( $C_p$ ) магний: 2-[65, 66] 3-[67] 4-маълумот [66], оиди ҳарорати Дебай ( $\Theta_D$ )

**Чадвали 1.6** – Қиматҳои гармиғунҷоиши кремнийи монокристаллӣ бо суръати гармкунии 4 К/дақ, ки муаллифон ба даст овардаанд [65]:

T, K	$C_p, \text{Ч}/(\text{моль} \cdot \text{К})$	T, K	$C_p, \text{Ч}/(\text{моль} \cdot \text{К})$
350	21.35	610	48.99
400	22.37	620	43.97
450	22.95	630	39.85
500	23.56	640	38.05
520	24.30	650	34.12
540	25.15	660	33.78
550	25.98	670	32.15
560	161.34	680	31.46
570	75.38	690	30.32
580	64.58	700	29.90
590	59.30	710	24.85
600	54.00	-	-

Натиҷаҳои ин тадқиқот дар адабиёт [68, 69] мухтасар тавсиф карда шуданд. Натиҷаи тадқиқот оид ба гармиғунҷоиши хоси кремнийи монокристаллӣ бо суръати 4 К/дақ, дар чадвали 1.5 нишон дода шудааст.

**Гармиғунҷоиши мис.** Мис дар фишори атмосфера сохти панҷараи кристалии кубии рӯяхояш марказонидашуда (ГЦК) то ҳарорати обшавии  $T_{пл} = 1357,6 \text{ К}$  бо даври  $\alpha=0,36147 \text{ нм}$  дар ҳарорати 293К дорад. Дар расми 1.4 ва чадвали 1.6 маълумот оид ба гармиғунҷоиши хоси мис оварда шудааст. Тавре ки аз расми 1.4 бармеояд, вобастагии  $C_p(T)$  аз  $\theta_D^0$  боло тофта шудааст ва каме (~30%) зиёдшавии  $C_p$  аз  $3\theta_D^0$  асосан аз ангармония ( $C_p - C_V$ ) аст (мувофиқи ҳисобҳо [70])  $C_p/C_V$  дар наздикии нуқтаи обшавӣ ба 20% мерасад. Коэффисиенти электронии гармиғунҷоиши мис  $\gamma_e=0,688 \text{ мЧ}/(\text{мол} \cdot \text{К}^2)$  [19].



Расми 1.5 – Вобастагии гармиғунҷоиши хоси мис ( $C_p$ ) аз ҳарорат: 1- [69]; 2 – [70];  $C_v$ -аз руи ҳисобҳо [70]; 3 – ҳарорати Дебай [70].

**Гармиғунҷоиш ва функсияҳои термодинамикии ҳӯлаи алюминийи АЖ2.18 бо қалъагӣ, сурб ва висмут чавҳаронидашуда.** Маълумот аз омӯзиши хосиятҳои термофизикӣ ва функсияҳои термодинамикии намунаҳои аз ҳӯлаи АЖ2.18 бо иловаҳои қалъагӣ, сурб ва висмут дар қадвалҳои 2,64 ва 2,65 чамбаст карда шудаанд [71], дар мисоли ҳӯлаҳое, ки дорои 0,5 мас.% элементи чавҳарӣ мебошанд. Ҳамин тариқ, маълум аст, ки бо зиёд шудани ҳарорат, гармиғунҷоиш, энталпия ва энтропияи ҳӯлаҳо афзоиш меёбанд, ва қимати энергияи Гиббси коҳиш меёбад.

**Ҷадвали 1.7** – Хосиятҳои гармофизикии мис [63]:

T, K	d, г/см <sup>3</sup>	C <sub>p</sub> , Ҷ/(кг · К)	α · 10 <sup>6</sup> , м <sup>2</sup> /с	λ, Вт/(м · К)	
50	-	-		1245	-
100	-	-		480	-
200	-	-	131 <sup>*</sup>	412	-
300	8.945	386.0	116	100.5	403 <sup>*2</sup>
400	8.878	397.5	112	390.1	392 <sup>*2</sup>
500	8.645	406.0	105	384.5	385 <sup>*2</sup>
600	8.790	415.5	102	375.7	378 <sup>*2</sup>
700	8.750	424.6	96.8	367.8	371 <sup>*2</sup>
800	8.695	430.8	94.2	359.4	364 <sup>*2</sup>
900	8.664	440.3	91.5	354.7	357 <sup>*2</sup>
1000	8.610	449.0	89.1	348.2	350 <sup>*2</sup>
1100	8.525	462.4	83.5	335.9	345 <sup>*2</sup>
1200	8.496	479.5	79.7	326.2	336 <sup>*2</sup>
1300	8.405	505.0	74.1	321.0	330 <sup>*2</sup>
1357.6 <sub>s</sub>	8.375 <sup>*1</sup>	523.5 <sup>*1</sup>	71.8 <sup>*1</sup>	316.5 <sup>*1</sup>	-
1357.6 <sub>l</sub>	8.100 <sup>*1</sup>	515.8 <sup>*1</sup>	44.2 <sup>*1</sup>	176 <sup>*1</sup>	-
1400	7.982	515.8	42.9	176	-
1600	7.967	515.8	17.5	182	-

**Ҷадвали 1.8** – Вобастагии гармиғунҷоиши хоси хӯлаи алюминийи АЖ2.18 аз ҳарорат, ки бо калъагӣ, сурб ва висмут ҷавҳаронида шудааст:

Гармиғунҷоиш	T, K					
	300	400	500	600	700	800
Al+2.18Fe	890,70	932.89	973.05	1014.98	1062.52	1119.46
Al+2.18Fe+0.5Sn	887,04	929.12	969.16	1010.97	1058.32	1115.03
Al+2.18Fe+0.5Pb	809,20	874.59	896.06	940.63	995.32	1067.15
Al+2.18Fe+0.5Bi	887,07	929.11	969.16	1010.95	1058.29	1114.98

Аз ин рӯ, характеристикаҳои баррасишудаи хосиятҳои гармофизикӣ, инчунин тағйирот дар функцияҳои термодинамикии намунаҳои хӯлаи

алюминийи АЖ2.18 бо қалъагӣ, сурб ва висмут, ки дар чадвали 1.9 оварда шудаанд. Ҳангоми зиёд шудани ҳарорат бузургиҳои гармиғунҷоиш, интиқоли гармӣ, энталпия, энтропияи ҳулаҳо афзуда энергияи Гиббс бошад коҳиш меёбад.

**Чадвали 1.9** – Тағйирёбии энталпия, энтропия ва энергияи Гиббс вобаста аз ҳарорат барои ҳулаҳои системаҳои АЖ2.18+Sn(Pb,Bi):

Таркиби ҳула	Т, К					
	300	400	500	600	700	800
Энталпия, кҶ/мол						
АЖ2,18	1.6474	92.8814	188.2071	287.6117	391.464	500.5145
АЖ2,18+0,5Sn	1.6800	95.5682	195.2857	301.2487	414.2529	535.4731
АЖ2,18+0,5Pb	2.5583	85.8099	173.3462	265.1260	361.8104	464.7624
АЖ2,18+0,5Bi	1.6402	92.4801	187.3955	286.3709	389.7712	498.3416
Энтропия, Ҷ/(мол · К)						
АЖ2,18	0,0053	0,2674	0,4798	0,6693	0,8208	0,9663
АЖ2,18+0,5Sn	0,0055	0,2753	0,4976	0,6908	0,8650	1,027
АЖ2,18+0,5Pb	0,0050	0,2442	0,4393	0,6066	0,7555	0,8929
АЖ2,18+0,5Bi	0,0055	0,2665	0,4782	0,6585	0,8178	0,9627
Энергияи Гиббс, кҶ/мол						
АЖ2,18	-0,00524	-14,1940	-51,9154	-109,2150	-183,509	-273,039
АЖ2,18+0,5Sn	-0,00642	-14,5656	-53,5217	-113,140	-191,054	-285,726
АЖ2,18+0,5Pb	-1,0574	-11,8662	-46,3288	-98,811	-167,034	-249,524
АЖ2,18+0,5Bi	-0,0051	-14,1299	-51,6830	-108,726	-182,685	-271,807

### 1.3. Кинетикаи оксидшавии хӯлаи алюминий бо оҳан, магний, кремний ва хӯлаи алюминийи АЖ2.18 бо қалъагӣ, сурб ва висмут

**Оксидшавии хӯлаҳои алюминий бо оҳан.** Кинетикаи оксидшавии хӯлаҳои системаи мазкур дар се таркиб бо 25,0; 50,0 ва 75,0 % массаи алюминий дар диапазони ҳарорати 1530–1600°C тадқиқ шудааст. Дар координатҳо  $(g/s)^2-t$ , хатҳои қач ба хатҳои рост мувофиқат мекунанд, ки ба раванди оксидшавии параболӣ ишора мекунанд. Бо афзоиши ҳарорат суръати оксидшавӣ дар ҳамаи таркибҳо меафзояд. Металҳои тоза нисбат ба хӯлаҳо суръати баланди оксидшавиро нишон медиҳанд. Масалан, дар ҳарорати 1570°C суръати оксидшавии оҳан  $7,2 \cdot 10^{-7} \text{ г}^2/\text{см}^4 \cdot \text{с}$ , алюминий —  $8,0 \cdot 10^{-8} \text{ г}^2/\text{см}^4 \cdot \text{с}$  ва хӯлаи бо таносуби 50:50 % —  $1,4 \cdot 10^{-8} \text{ г}^2/\text{см}^4 \cdot \text{с}$ -ро ташкил медиҳад. Дар айни ҳол, хурдтарин суръати оксидшавӣ барои хӯлаи дорои 25 % массаи алюминий ба қайд гирифта шудааст.

Барои хӯлаҳои системаи мазкур хосияти баръакси вобастагии энергияи ғаёлсозӣ мушоҳида мешавад. Агар энергияи ғаёлсозии оксидшавӣ барои ғудохтаи оҳан 13 ккал/мол ва барои алюминий 18 ккал/молро ташкил диҳад, пас барои хӯлаҳои омӯхташуда ин қиматҳо ба маротиб баландтар буда, дар доираи 100–135 ккал/мол ҷойгиранд [72, 73].

Қоҳиш ёфтани константаи суръати оксидшавии хӯлаҳо нисбат ба компонентҳои тоза метавонад ба ташаккули плёнкаи муҳофизатии шпинелӣ вобаста бошад, ки ин раванд оксидшавии хӯларо муҳофизат мекунад. Таҳлили спектрҳои инфрасурх (ИС) нишон медиҳад, ки дар маҳсулоти оксидшавии хӯлаҳои Al–Fe рахҳои азхудкунӣ дар 455, 491, 593 ва 630  $\text{см}^{-1}$  мушоҳида шуданд, ки ба мавҷудияти фазаи  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  ишора мекунанд [72, 73]. Ҳамзамон, рахҳои 475, 570, 620 ва 680  $\text{см}^{-1}$  натиҷаи ташаккули маҳлули саҳти  $\text{Fe}_3\text{O}_4 - \text{FeAl}_2\text{O}_3$  мебошанд [72]. Бо зиёд шудани миқдори алюминий, миқдори оксиди алюминий дар маҳсулоти оксидшавӣ қоҳиш меёбад, ки бо паст шудани шиддати рахҳои мувофиқи азхудкунӣ тасдиқ мегардад. Дар ҳамин ҳол, марҳилаи шпинелии  $\text{FeAl}_2\text{O}_4$  бо  $\text{FeAl}_2\text{O}_3$  маҳлули саҳт ташкил медиҳад, ки ба

рахҳои 410, 433, 462, 505, 530, 560, 610 ва 645 см<sup>-1</sup> мувофиқ аст. Ин тадқиқот нишон медиҳад, ки маҳсулоти оксидшавии хӯлаҳои Al-Fe дорои таркиби тағйирёбандаи фазаҳо мебошанд.

**Оксидшавии хӯлаҳои алюминий бо магний.** Хӯлаҳои системаи Al-Mg дар ҳолати моеъ дорои тақсимоти бетартибонаи атомҳо мебошад. Хусусиятҳои термодинамикӣ ва сохти электроники онҳо мавриди омӯзиш қарор гирифтаанд [72].

Магнийи тоза ва техникӣ дар ҳарорати баланд муқовимати паст ба оксидшавӣ дошта, ҳангоми гармкунии дар ҳаво ё атмосфераи оксиген тамоюли алангагирӣ доранд. Тибқи иттилои муаллиф [72], лентаи магний дар ҳарорати 507°C ва чанги магний — вобаста ба андозаи зарраҳо — дар ҳудуди 475–560°C оташ мегирад. Барои баъзе хӯлаҳои рехташудаи магний, ҳангоми гармкунии тӯлонӣ дар ҳаво, алангагирӣ дар ҳарорати 427°C мушоҳида шудааст. Ҳамчунин дар тадқиқоти муаллиф [72] муайян шудааст, ки даргиршавии хӯлаҳои магний асосан дар минтақаи ҳароратии байни нуқтаи моеъшавӣ ва солидус ба амал меояд.

Тадқиқоти таъсири иловаҳои алюминий ба ҳарорати оташгиршавии магний ҳангоми дар атмосфераи оксиген гарм кардани он муайян кардааст, ки ҳангоми то 63% афзудани таркиби алюминий оташгирӣ хӯлаҳо пайваستا паст карда ва то 80% ва аз он боло зиёд шудани таркиби алюминий хӯлаҳо қобилияти оташгирии худро гум мекунанд [72].

Муқовимат ба оксидшавӣ дар ҳарорати баланд хӯлаҳои рехташудаи магний-алюминийи тамғаҳои МЛ4 ва МЛ5 дар шароити гарм кардани онҳо дар атмосфераи ҳаво, нитроген, гази карбон ва дуоксиди сулфур омӯхта шудааст [72].

**Оксидшавии хӯлаҳои моеи системаи алюминий – кремний.** Дар системаи Al-Si хӯлаҳо дар се минтақа — тоэвтектикӣ, эвтектикӣ ва баъдиэвтектикӣ — мавриди тадқиқ қарор гирифтанд, то вобастагии энергияи фаъолшавии раванди оксидшавӣ муайян карда шавад. Маълумоти таҷрибавӣ

барои ин хӯлаҳо дар чадвали 1.10 оварда шудааст [74, 75], ки нишон медиҳад энергияи фаъолшавӣ вобаста ба таркиби хӯла тағйир меёбад ва ба хусусиятҳои сохторӣ ва фазавии минтақаҳои зикршуда алоқаманд аст.

Оксидшавии алюминийи тоза дар ҳароратҳои 973, 1023 ва 1073 К гузаронида шуд. Бо афзоиши ҳарорат вобаста ба вақт афзоиши вазни хоси намуна ( $g/s$ ) мушоҳида мешавад. Алюминийи моеъ дар 20 дақиқаи аввали таъсир ба оксиген бо суръати баланд ва ба таври хаттӣ оксид мешавад. Баъд аз ин марҳила, дар натиҷаи ташаккули қабати муҳофизатии оксид — асосан  $\alpha$ - $Al_2O_3$  — суръати оксидшавӣ коҳиш меёбад. Ин раванд бо графикҳои қачхатаи дорои шакли параболӣ тавсиф меёбад, ки коҳишҳои прогрессивии суръати оксидшавиро нишон медиҳад. Минбаъд оксидшавӣ то 60 дақиқа дигар боиси ба таври намоён зиёд шудани вазни хос намегардад. Дар ҳарорати 973—1073 К суръати оксидшавии алюминийи моеъ дар доираи аз  $2.79 \cdot 10^{-4}$  то  $6.58 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  баробар мешавад, ки ба маълумоти адабиёт мувофиқ аст. Бузургии энергияи намоёни фаъолшавии раванди оксидшавӣ ба 74,48 кҶ/мол баробар аст. Баланд шудани суръати воқеии оксидшавӣ то  $7.18 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  дар 1073 К ҳангоми модификацияи алюминий бо 2%-массаи кремний ба қайд гирифта шудааст. Дар ҳамин ҳолат, энергияи фаъолшавии раванди оксидшавӣ то 56,32 кҶ/мол коҳиш меёбад. Ин раванди оксидшавӣ хусусияти параболӣ дорад, ки ба ташаккули қабати муҳофизатӣ ва маҳдуд шудани интиқоли масса дар сатҳ ишора мекунад. Суръати оксидшавии раванд бо баланд шудани ҳарорат аз 973 то 1023 ва 1073 К зиёд мешавад [74].

Дар ҳарорати 973 К, ташаккули қабати оксиди муҳофизатӣ дар хӯла дар дақиқаи 30-юм ба итмом мерасад, вақте ки ҳарорат ба 1073 К мерасад, ин раванд хеле тезтар давом мекунад ва дар давоми 15-20 дақиқа анҷом меёбад [74].

Ҳамин тавр, таҳлили хосиятҳои оксидшавии силуминҳои тоэвтектикӣ ва эвтектикӣ дар ҳарорати изотермикии 973 К нишон медиҳад, ки бо афзудани миқдори кремний дар алюминий то таркиби эвтектикӣ, суръати воқеии

оксидшавӣ ба таври назаррас меафзояд: аз  $2,79 \cdot 10^{-4}$  кг·м<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup> барои алюминийи холис то  $14,21 \cdot 10^{-4}$  кг·м<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup> барои хӯлаи дорои таркиби эвтектикӣ, мушоҳида карда мешавад. Баландшавии суръати оксидшавӣ ба камшавии энергияи фаъоли оксидшавӣ барои металли тоза аз 74,48 кҶ/мол барои силумини эвтектикӣ то 56,94 кҶ/мол баробар мешавад. Ҳамаи ин аз зиёд паст шудани сохти пардаи оксидии муҳофизатӣ ҳангоми хӯлаи алюминий бо кремний чавҳаронидашуда гувоҳӣ медиҳад [74].

Муқоисаи натиҷаҳои тадқиқоти термодинамикӣ ва маълумот таҳлили физикӣ ва химиявӣ хӯлаҳои моеи Al-Si, ба хулосае омадан мумкин аст, ки сохти мураккаби гудохтаҳои силумин вобаста ба ҳарорат ва таркиб тағйир меёбад. Дар натиҷаи аз ҳарорати муқарарӣ зиёд шудани гармӣ, хосиятҳои физикӣ-химиявӣ хӯлаҳои алюминийи моеи системаи Al-Si наздик ба хосиятҳои маҳлул бо дуршавии мусбат аз ҳолати пурра, дар ҳоле ки дар ҳарорати баланд, ташаккули фазаҳои мобайнии метастабил муқаррар карда шудааст. Мувофиқи маълумоти термодинамикӣ барои силумини моеъ бо дуршавиҳои манфӣ аз ҳолати ҳақиқӣ ҷойгир аст, ки на аз ҳисоби гармӣ, балки бо истилоҳи энтропии энергияи озоди Гиббс ба вуҷуд меояд [75].

**Кинетикаи оксидшавии хӯлаи алюминийи системаи АЖ2,18 бо қалъагӣ, сурб ва висмут.** Омӯзиши вобастагии ғайрихаттӣ  $(g/s)^2-t$  қачхатаҳои кинетикии оксидшавии хӯлаи АЖ2.18 бо иловаҳои қалъагӣ, сурб ва висмут нишон медиҳад, ки раванди оксидшавӣ танҳо ба қонуни гипербола итоат мекунад. Ба ин натиҷаҳои коркарди қачхаттаҳои квадрати оксидшавии хӯлаҳои дар ҷадвал 1.11 овардашуда шаҳодат медиҳанд. Дар мисоли хӯлаи АЖ2.18 бо иловаҳои 0,1 ва 0,5 мас.% Pb ва Bi. Қачхатаҳо вобастагии  $(g/s)^2-t$  бо ёрии муодилаи  $Y = kn$  тавсиф мекунад, ки дар он  $n=2-4$  вобаста ба таркиби хӯлаи оксидшаванда аст.

**Ҷадвали 1.10** – Параметрҳои кинетикӣ ва энергетикӣ раванди оксидшавии хӯлаҳои системаи Al-Si дар ҳолати моеъ [74]:

Al	Si	Ҳарорати оксидшавӣ, К	Суръати миёнаи оксидшавӣ $K \cdot 10^4$ , $\text{кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	Энергияи фаъоли самарабахш кҶ/мол
% - масса				
100	0	973	2.79	74.48
		1023	4.73	
		1073	6.58	
96	4	973	3.61	64.90
		1023	5.78	
		1073	9.20	
90	10	973	5.12	56.94
		1023	7.18	
		1073	14.21	
84	16	973	6.12	68.67
		1023	10.65	
		1073	12.62	
75	25	1073	16.59	87.30
		1073	2.07	
		1123	8.28	
50	50	1173	12.21	136.91
		1373	8.29	
		1423	12.46	
40	60	1473	22.32	139.01
		1423	9.38	
		1473	12.34	
20	80	1523	20.12	159.11
		1573	12.45	
		1623	16.58	
0	100	1673	24.96	175.90
		1703	6.58	
		1853	18.78	

**Чадвали 1.11** – Натиҷаҳои коркарди математикии каҷхатҳои кинетикии оксидшавии хӯлаи алюминийи АЖ2.18, ки бо сурб ва висмут чавҳаронидашуда, дар ҳолати сахтӣ [76]:

Миқдори Pb ва Bi дар таркиби хӯла, %-масса	Ҳарорати оксидшавӣ, К	Полиномаҳои каҷхатҳои кватратии кинетикаи оксидшавии хӯлаҳо	Кoeffициенти коррелятсия R <sup>2</sup>
0.0	673	$y = 7x^4 \cdot 10^{-6} - 0.0005x^3 + 0.0116x^2 - 0.0313x$	0.993
	773	$y = 8x^4 \cdot 10^{-6} - 0.0006x^3 + 0.0142x^2 - 0.0344x$	0.994
	873	$y = 9x^4 \cdot 10^{-6} - 0.0007x^3 + 0.0163x^2 - 0.0304x$	0.997
0.1 Pb	673	$y = 3E-06x^4 - 0.0002x^3 + 0.0042x^2 - 0.0015x$	0,968
	773	$y = 5E-06x^4 - 0.0003x^3 + 0.0055x^2 + 0.0045x$	0,969
	873	$y = 6E-06x^4 - 0.0004x^3 + 0.0081x^2 + 0.0034x$	0,991
0.5 Pb	673	$y = 3E-06x^4 - 0.0002x^3 + 0.0028x^2 + 0.0088x$	0,961
	773	$y = 4E-06x^4 - 0.0003x^3 + 0.0047x^2 + 0.0078x$	0,970
	873	$y = 6E-06x^4 - 0.0004x^3 + 0.0077x^2 + 0.0029x$	0,990
0.1 Bi	673	$y = 2E-05x^4 - 0.0011x^3 + 0.0225x^2 - 0.0385x$	0,984
	773	$y = 3E-05x^4 - 0.002x^3 + 0.0406x^2 - 0.0755x$	0,991
	873	$y = 3E-05x^4 - 0.0022x^3 + 0.0452x^2 - 0.055x$	0,993
0.5 Bi	673	$y = 3E-05x^4 - 0.002x^3 + 0.0416x^2 - 0.0745x$	0,990
	773	$y = 3E-05x^4 - 0.0026x^3 + 0.0567x^2 - 0.1249x$	0,996
	873	$y = 4E-05x^4 - 0.003x^3 + 0.0623x^2 - 0.0691x$	0,997

Дар чадвали 1.12 натиҷаҳои умумии энергияи фаёли самарабахши раванди оксидшавии хӯлаи АЖ2.18 бо иловаҳои қалъагӣ, сурб ва висмут бо таркибҳои гуногуни нишон дода шудааст. Бояд қайд кард, ки хӯлаҳое, ки бо қалъагӣ омехта карда шудаанд, дорои баландтарин энергияи фаёли самарабахш мебошанд.

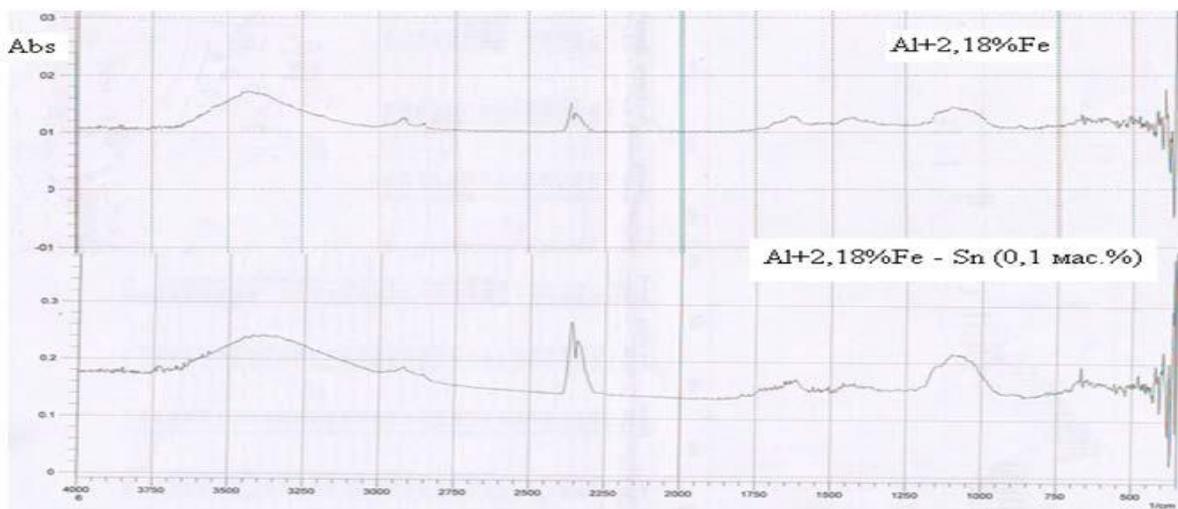
**Қадвали 1.12** – Вобастагии энергияи фаъоли самарабахши раванди оксидшавии хӯлаи алюминийи АЖ2.18, ки бо Sn, Pb ва Bi ҷавҳаронидашуда, дар ҳолати сахтӣ [77]:

Микдори Sn, Pb и Bi дар таркиби хӯла, % - масса Система	0,0	0,005	0,05	0,1	0,5
АЖ2.18Fe + Sn	56.0	57.3	59.8	61.0	63.1
АЖ2.18Fe + Pb	56.0	31.8	38.2	47.8	54.3
АЖ2.18Fe + Bi	56.0	61.4	74.8	46.4	38.2

Муаллифони [77, 78] барои омӯхтани маҳсулоти оксидшавии хӯлаи АЖ2.18 аз усули спектроскопияи инфрасурх (ИС) истифода карданд. Масалан, дар расми 1.6 ҳамчун мисол, спектрҳои ИС-и маҳсулоти оксидшавии хӯлаи АЖ2.18 бо илова кардани қалъагӣ нишон дода шудаанд. Натиҷаҳои тадқиқот нишон доданд, ки хангоми оксидшавии хӯлаҳо оксидҳои одӣ ва мураккаб ба вучуд меоянд. Дар рафти таҳлили спектри ИС-и маҳсулоти оксидшавии хӯлаи АЖ2.18 бо иловаи қалъагӣ муайян карда шуд, ки басомадҳои абсорбсия дар 455, 470, 598, 640, 680, 685 ва 790  $\text{см}^{-1}$  ба пайвандҳои Al–O мансуб буда, хоси оксидҳои алюминий мебошанд. Ин басомадҳо асосан дар хӯлаҳои мушоҳида мешаванд, ки микдори ками (0,01–0,05 мас.%) қалъагӣ доранд. Басомадҳои 805, 785, 646, 614, 465, 400, 1090, 1385 ва 1495  $\text{см}^{-1}$ , эҳтимолан, ба оксидҳои мураккаби ба воситаи ҳамтаъсирии оксидҳои алюминий ва қалъагӣ ба вучудномада мансубанд.

Дар маҷмӯъ, хангоми пайгирии алоқамандии байни тағйирёбии суръати оксидшавии хӯлаи АЖ2.18 аз хӯлаи бо қалъагӣ ҷавҳаронидашуда, дар ҳарорати доимӣ, ба хулосае омадан мумкин аст, ки коҳиши суръати раванди оксидшавӣ

ва инчунин мутаносибан ба афзоиши хароҷоти энергия барои раванди оксидшавии хӯлаҳои чавҳаронидашуда оварда мерасонад.



**Расми 1.6** – Спектрҳои ИС-и маҳсулоти оксидшавии хӯлаи алюминийи АЖ2.18, ки бо қалъагӣ чавҳаронидашудааст.

**Чадвали 1.13** – Таркиби марҳилавии маҳсулоти оксидшавии хӯлаи алюминийи АЖ2.18, ки бо висмут омехта шудааст:

Микдори висмут дар таркиби хӯла, % - масса	Басомади спектри ИС , см <sup>-1</sup>	Таркиби марҳилаи маҳсулоти оксидшавии хӯла мувофиқи маълумоти ТФР
0.0	465,505,670,775,1095	$\gamma - Al_2O_3$
0.05	465,615,750,1100,700	$\gamma - Al_2O_3$
0.3	460,610,650,1100,700	$\gamma - Al_2O_3$
0.6	460,610, 1100	$\gamma - Al_2O_3$
1.0	460,600, 1100	$\gamma - Al_2O_3$

Дар асоси маълумоти спектрҳои ИС-и маҳсулоти оксидшавии хӯлаҳо, ки дар чадвали 1.13 оварда шудаанд, метавон ба хулосае омад, ки маҳсулоти оксидшавии хӯлаҳои системаи АЖ2.18+Ві асосан марҳилаи  $\gamma$ -Al мебошанд, ки мавҷудияти басомадҳои абсорбсияро дар бандҳои 427, 465, 500, 615, 650, 775, 1100 см<sup>-1</sup> тасдиқ мекунад.

Муаллифони [79] дар асоси тадқиқоти кинетикаи оксидшавии хӯлаи АЖ2.18 бо иловаи қалъагӣ, сурб ва висмут дар ҳолати саҳт муайян карданд, ки раванди оксидшавӣ ба қонуни гиперболӣ итоат мекунад ва суръати ҳақиқии он дар тартиби  $10^{-4}$  кг·м<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup> ҷойгир аст. Ҳамзамон, муайян гардид, ки хӯлаи АЖ2.18 бо висмут дорои қиматҳои камтарини суръати оксидшавӣ аст ва қиматҳои максималӣ ба хӯлаи бо сурб ҷавҳаронидашуда тааллуқ доранд.

#### **1.4. Рафтори анодии хӯлаҳои алюминий бо оҳан, қалъагӣ, сурб, висмут ва хӯлаи алюминий АЖ2.18**

##### ***Рафтори хӯлаҳои системаи Al - Fe дар муҳити электрохимиявӣ.***

Тағйироти зиёди потенциали электрод (~0,4 В) барои хӯлаи алюминий бо Fe ошкор карда нашуд, зеро потенциали FeAl<sub>3</sub> дар ҳудуди 0,4 ÷ -0,5 В, ва барои Al ба 0,8В баробар мебошад. Мувофиқи маълумоти [80], иловаи оҳан боиси коҳиши муқовимат ба зангзании алюминий мегардад. Тибқи маълумоти [81], зангзании байникристаллӣ метавонад дар натиҷаи ҷудошавии миқдори ками оҳан дар маҳлули саҳт, ки дар сарҳади зерсохторҳо ва донаҳо ҷойгир мешавад, ба вучуд ояд. Дар ҳол, муаллифони [82] гузариши зангзании байникристаллиро ба зангзании питтингӣ баррасӣ намудаанд.

Дар ҷадвали 1.14 натиҷаҳои тадқиқоти муаллифони [83] оид ба таъсири оҳан ба хусусиятҳои электрохимиявии алюминий оварда шудаанд. Таҳлилҳо нишон медиханд, ки бо зиёд шудани миқдори оҳан дар хӯла, тамоми потенциалҳо ба самти бузургиҳои мусбат ҳаракат мекунанд, яъне афзоиши консентратсияи оҳан боиси мусбатшавии потенциалҳои электрохимиявӣ мегардад.

Муаллифони [84] бо мақсади омӯзиши эффекти дифференциалӣ – яъне тағйирёбии суръати худҳалшавӣ дар шароити поляризатсияи анодӣ- тадқиқот анҷом доданд. Барои санҷишҳои потенциодинамикӣ, галваностатикӣ ва гравиметрӣ намунаҳои цилиндршакл истифода шуданд, ки дар қолаби пӯлод

рехта ва сатҳи кориашон сайқал дода шуда буданд. Ҳамчун муҳити корӣ симулятори оби баҳр – маҳлули 3% NaCl истифода шудааст.

Муаллифони [85] самаранокии катодикии хӯларо тавассути сабт намудани қачхатаҳои поляризацияи катодӣ дар шароити гуногун — ҳам бо поляризация ва ҳам бе он — дар муддати муайяни нигоҳдорӣ дар маҳлул тадқиқ намудаанд. Ин таҳлил ба муайян кардани тағйироти фаъолияти электродии хӯлаҳо дар муҳити кори мусоидат кардааст. Дар асоси қачхатҳои поляризацияшуда бадастомада чараёни маҳдудкунандаи диффузияи электроредуксияи оксиген ( $i_{\text{диф.}}$ ) муайян карда шуд, ки тағйирёбии фраксияи фаъоли сатҳи реаксияро дар натиҷаи таҳшиншавии тақрории Fe нишон медиҳад.

**Ҷадвали 1.14** – Таъсири оҳан ба хосиятҳои электрохимиявии алюминий дар муҳити электролити 3% NaCl [85]:

Fe, %- масса	Потенциалҳои электрохимиявӣ (н.в.э.), В						$i_{\text{кор.}}$ А/м <sup>2</sup>	К.10 <sup>-3</sup> , г/м <sup>2</sup> .соат
	-E <sub>св.кор.</sub>	-E <sub>кор.</sub>	-E <sub>реп.</sub>	-E <sub>п.о.</sub>	-E' <sub>п.о.</sub>	$\Delta E_{\text{пас}}$		
1.0·10 <sup>-5</sup>	0.78	0.76	0.55	0.48	0.46	0.38	0,0030	1.00
1.5·10 <sup>-3</sup>	0.76	0.76	0.55	0.48	0.46	0.36	0,0033	1.11
5·10 <sup>-3</sup>	0.75	0.76	0.55	0.48	0.46	0.36	0,0035	1.17
0.01	0.70	0.73	0.54	0.46	0.45	0.35	0.0040	1.34
0.15	0.54	0.57	-	0.40	0.45	0.35	0.0050	1.67
0.20	0.53	0.56	0.50	0.36	0.42	0.35	0.010	3.35
0.3	0.52	0.55	-	0.37	0.41	0.35	0.012	4.69
1.0	0.53	0.5	-	0.42	0.42	0.33	0.020	8.04
1.5	0.50	0.55	0.52	0.40	0.40	0.30	0.027	26.8
2.18	0.57	0.55	0.54	-	0.41	0.44	0.008	13.4
3.00	0.51	0.50	0.52	0.42	0.40	0.35	0.050	16.7

Нишондиҳандаи асосии электрохимиявӣ — чараёни зангзанӣ аз қачхаттаи поляризацияи катодӣ бо истифода аз доимии Тафел (0,12 В) муайян карда

мешавад. Баъдан, суръати зангзании электрохимиявӣ (K) аз формулаи зерин муайян карда мешавад.

$$K = i_{\text{кор.}} \cdot k,$$

Дар ин ҷо: k- эквиваленти электрохимиявӣ. Бузургии k барои алюминий ба 0.335 г/А·ч баробар аст [86].

Дар адабиёт [87] хӯлаҳое, ки миқдори зиёди оҳан доранд, бо тавсифи потенциалҳои баланди мусбӣ қайд карда шудааст.

Омили муайянкунанда дар раванди зангзанӣ ин суръати ҳалшавӣ мебошад. Суръати зангзанӣ аз консентратсияи оҳан дар хӯла ва вақти реаксия бо маҳлул вобаста аст.

Барои алюминийи холис  $i_{\text{диф}}$  ба 0,006 - 0,010 А/м<sup>2</sup> А/м<sup>2</sup> баробар аст ва вақте ки дар таркиби хӯла 3% оҳан мавҷуд аст,  $i_{\text{диф}} = 0,145$  А/м<sup>2</sup> яъне, ба арзиши ҳисобшуда наздик мешавад [87].

**Ҷадвали 1.15** –Қиматҳои таъсири дифференсалии (D) хӯлаҳои системаи

Al-Fe [87]:

Таркиби Fe, %-масс.	Дифференсиал – таъсир ҳангоми зичии ҷараён, А/ м <sup>2</sup>			
	1.5	2.0	3.0	6.0
0.005	+ 0.044	+ 0.032	+ 0.0013	- 0.046
0.3	- 0.066	- 0.071	- 0.066	- 0.158
0.6	- 0.086	- 0.097	- 0.166	- 0.166
0.9	- 0.077	- 0.105	- 0.026	- 0.080
1.2	- 0.131	- 0.217	- 0.259	- 0.220
1.5	- 0.229	- 0.281	- 0.130	- 0.193
2.0	- 0.437	- 0.330	- 0.371	- 0.286
3.0	- 0.579	- 0.693	- 0.646	- 0.544
5.0	- 0.608	- 0.486	- 0.831	- 0.357

Барои хӯлаҳое, ки дар таркибашон аз 1,5% Fe мавҷуд аст, нишондиҳандаи самарабахши калидӣ (КПИ) то 75% мерасад. Аммо бо афзоиши консентратсияи оҳан то 15-20%, қимати КПИ ба таври назаррас коҳиш меёбад. Мувофиқи маълумоти муаллифон [87], иловаи элементи сеюм ба хӯлаҳои муҳофизати

метавонад таъсири манфии Fe – ро коҳиш дода, имкони коркарди хӯлаҳои муҳофизатии асосёфта ба алюминийи дуумдараҷаро фароҳам созад.

Муаллифон [87] раванди зангзаниро мавриди баррасӣ қарор доданд, муайян карданд, ки ҳангоми зангзании хӯлаҳои системаи Al-Fe ба маҳлул Al ва Fe дохил мешаванд, дар ҳоле ки ионҳои Fe аз маҳлул баромада, тағшон мешаванд.

Тибқи маълумоти адабиёти [88] рафтори анодии кинетикии хӯлаҳои алюминий бо иловаи оҳан дар маҳлулҳои сахт омӯхта шудааст. Натиҷаҳои нишон доданд, ки ҳатто бо ворид шудани оҳан ба таркиби алюминий, қачхатаҳои анодӣ тағйироти назарраси шакл ё хусусият нишон наметоҳад. Ин ҳолат далели он аст, ки оҳан дар ин концентратсияҳо ба раванди анодшавии алюминий таъсири ҷиддӣ намерасонад.

**Рафтори анодии хӯлаҳои алюминий бо қалъагӣ.** Рафтори анодии хӯлаҳои алюминий бо қалъагӣ дар муҳити хлориди натрий нишон медиҳад, ки иловаи қалъагӣ ба алюминий таъсири мураккаб мерасонад. Гарчанде ки потенциали электроди Sn (-0,50В) нисбат ба Al (-0,85В) фарқи мусбӣ кам дорад, аммо дар муҳити хлориди натрий, потенциали анодии хӯла то 1,72 В коҳиш меёбад [89].

Ин ба пайдоиши таъсири катодӣ-иёнӣ вобаста аст, ки боиси афзоиши эҳтимолияти зангзании питтингӣ мешавад. Ҳангоми илова кардани қалъагӣ, хӯлаҳо метавонанд фазаҳои дучузъӣ (Al-Sn) ташкил диҳанд, ки дар онҳо минтақаҳои катодӣ ва анодӣ ташаккул меёбанд ва суръати зангзани дар муҳити хлориди афзоиш меёбад [89].

Дар муҳити турш ва ишқорӣ, қалъагӣ метавонад ба коҳиш додани устувории анодии алюминий оварда расонад, зеро фазаҳои бой аз Sn ҳамчун катод амал мекунанд ва ҳалшавии алюминийро метезонанд.

Зангзании хӯлаҳои алюминий-қалъагӣ дар маҳлули NaCl ба таври муфассал омӯхта шудааст. Барои ин, хӯлаҳо аз алюминийи тозаи 99,99% ва қалъагии 99,95% бо иловаҳои 0,01–0,1% мас. Sn тайёр карда шудаанд.

Мақсад аз илова кардани миқдори ками қалъагӣ — омӯзиши таъсири он ба раванди зангзанӣ ва хосиятҳои электрохимиявии хӯлаҳо мебошад. Зеро қалъагӣ метавонад боиси тағйирёбии потенциали электродии алюминий гардад ва дар ҳузури хлоридҳо ( $\text{NaCl}$ ) механизми зангзании пittingро таҳриқ диҳад ё баръакс коҳиш диҳад [91].

Ҳамин тавр, хӯлаҳои омодашуда барои муайян кардани самаранокии қалъагӣ дар баланд бардоштани муқовимати алюминий ба зангзанӣ тадқиқ шудаанд.

Тадқиқоти зангзанӣ ва электрохимиявии хӯлаҳои алюминий-қалъагӣ нишон доданд, ки ҳолати термикӣ намунаҳо таъсири назаррас ба раванди зангзанӣ мерасонад. Намунаҳое, ки дар ҳарорати  $600^\circ\text{C}$  дар тӯли 36 соат гомогенизатсия шуда ва пас аз он дар оби  $0^\circ\text{C}$  хунук карда шудаанд, бо хӯлаҳои бе коркарди термикӣ муқоиса карда шуданд. Гомогенизатсия ва хунуккунии тези минбаъда ба тафрикаи микросохтор таъсир расонда, тақсимои элементҳои легиркунандаро баробар мекунад ва имкони пайдоиши минтақаҳои зангзанандаи фаълро коҳиш медиҳад. Аз натиҷаҳо бармеояд, ки хӯлаҳои гомогенизатсияшуда муқовимати бештар ба зангзанӣ дар маҳлули  $\text{NaCl}$  нишон додаанд, ки бо яқрангии сохтор ва камшавии фазаҳои катодии маҳаллӣ (масалан, бо  $\text{Sn}$  ғанишуда) шарҳ дода мешавад [92, 93].

Аз қачхатҳои потенциодинамикӣ дар маҳлулҳои хлориди натрий бо  $\text{pH}$  6; 3.1 ва 2.1, ки дар шароити деаэратсияшуда гирифта шудаанд, чунин натиҷаҳо ба даст омадаанд:

- Қараёнҳои катодӣ ва потенциали репассиватсия ( $E_p$ ) барои алюминийи холис, қалъагии холис ва хӯлаи  $\text{Al}-0,1\% \text{ Sn}$  муайян карда шудаанд;

- Дар муҳити бо  $\text{pH}$  баланд ( $\text{pH} = 6$ ), суръати раванди катодии барқароршавии оксид хеле суст аст, яъне барқароршавии ионҳои  $\text{H}^+$  ва ё  $\text{O}_2$  коҳиш меёбад;

- Бо кам шудани  $\text{pH}$  (кислотатар шудани муҳит), реаксияҳои катодӣ фаълтар мешаванд, ки метавонад ба шиддатёбии зангзанӣ мусоидат кунад;

- Хӯлаи дорои 0,1% Sn дар муқоиса бо алюминийи ҳолис потенциали Ереп.-и пасттар ва фаъолияти баландтари катодӣ нишон медиҳад, ки нишонгари таъсири қалъагӣ ба реаксияҳои электрохимиявӣ мебошад.

Муҳити атроф ва ҳосиятҳои таркибии хӯла ба потенциали репасиватсия (Ереп.) таъсири ҷиддӣ мерасонанд:

- Ҳангоми кам шудани рН аз 6 то 2,2, яъне бештар кислотай шудани муҳит, потенциали рахнашуда аз  $-1,12$  В то  $-1,23$  В (н.в.э.) паст мешавад — ин нишон медиҳад, ки хӯла бештар ба рахнашавии зангзании питтингӣ майл мекунад.

- Мавҷудияти пай ё хароша дар сатҳи намунаҳо таъсири чашмгир ба ташаккули питтингҳо надорад — яъне оғозёбии рахнашавӣ бештар ба таркиб ва муҳит вобаста аст, на ба нуқсонҳои механикӣ.

- Вақте ки рН доимист ва миқдори Sn кам мешавад, потенциали рахнашавӣ ба самти мусбат тағйир меёбад — яъне хӯла ба зангзанӣ устувортар мегардад.

Бо зиёд шудани Sn ва кислотай будани муҳит потенциали рахнашавиро ба самти манфӣ мебарад, ки нишонаи осебпазирии бештари хӯла ба питтинг мебошад.

Ҳангоми миқдори қалъагӣ аз 0,1% то 0,01% коҳиш меёбад, потенциали рахнашавӣ аз  $-1,12$  В то  $-0,65$ В боло меравад – яъне хӯла устувортар шуда майли он ба зангзании питтингӣ коҳиш меёбад. Дар хӯлаҳое, ки миқдори ками қалъагӣ доранд, ҳатто бо поляризатсияи тӯлонӣ ҳам, зангзании маҳдуд мушоҳида мешавад ва ин нишон медиҳад, миқдори хеле ками Sn метавонат таъсири муҳофизати расонад [94].

Тибқи тадқиқоти муаллифони [95], суръати зангзани бо усули гравиметрӣ мутобиқи стандарти ГОСТ 9017-74, дар маҳлули 3%-и NaCl муайян карда шудааст. Санҷишҳои намунаҳо барои муайян кардани зангзании умумӣ тавассути талафи масса (дар се намунаи параллелӣ) анҷом дода шуданд. Тибқи натиҷаҳои Ҷадвали 1.16, пасттарин суръати зангзанӣ ба алюминийи ҳолис рост

меояд. Суръати зангзании хӯлаҳо бошад, ба таври назаррас баланд буда, бо афзоиши миқдори қалъагӣ боз ҳам меафзояд, хусусан дар минтақаи дуфазаӣ. Хӯлаҳои якфазаие, ки миқдори қалъагӣ дар онҳо то 0,02% мебошад, сатҳи қаноатбахши муқовимат ба зангзанӣ нишон медиҳанд. Дар ҳамаи намунаҳои санчидашуда суръати зангзанӣ бо гузашти замон коҳиш меёбад. Дар хӯлаҳо мавҷуд будани ҷузъҳои катодии зиёдатӣ раванди анодии ионизатсияи алюминийро метезонад (ниг. Ҷадвали 1.10).

**Ҷадвали 1.16** – Таркиби хӯлаҳои Al-Sn ва суръати миёнаи зангзанӣ [95]:

Миқдори олова дар хӯла, % - масса		Суръати зангзанӣ, г/(м <sup>2</sup> · ҷ), ҳангоми санчиши тӯлонӣ		
Мувофиқи шихта	Мувофиқи таҳлил	1 моҳ	3 моҳ	6 моҳ
-	-	0,00037	0,00018	0,00012
0,01	0,0049	0,0133	0,00562	0,00267
0,02	0,028	0,0146	0,00542	0,00255
0,5	0,47	0,0696	0,0264	0,0149
1,0	0,71	-	0,0260	0,0147
3,0	2,0	0,1275	0,0726	0,0405
5,0	4,4	0,3363	0,1579	0,1038

Таҳлилҳои химиявӣ нишон доданд, ки қалъагӣ дар муҳити зангзананда ҳал намешавад. Натиҷаҳои таҳлилі металлוגрафӣ табиати якхелаи зангзании хӯлаҳоро тасдиқ намуданд ва нишонаҳои питинг ёфт нашуд. Таҳлили рентгенофазавии сатҳи намунаи дорои 5,0% Sn, ки ба муҳити зангзананда тӯли 3 моҳ дучор гардидааст, мавҷудияти ду фаза - β-Sn ва бемит Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · H<sub>2</sub>O – ро ошкор намуд [96].

**Ҷадвали 1.17 – Хусусиятҳои электрохимиявӣ (х.с.э.) ҳулаҳои системаи Al-Sn [97]:**

Миқдори қалбағӣ, Бо %-и масса	-Ест. дар 6 соат	-Енп	-Еп.п.	-Еп.о.	-Ер.п.	$i_{нп}$	$i_{пп}$
	мВ					мА/см <sup>2</sup>	
0	985	1700	1420	680	720	1.90	0.48
0.0025	995	1750	1550	820	830	1.19	0.38
0.005	1000	1780	1550	820	830	1.19	0.35
0.015	1095	1750	1540	820	830	1.20	0.37
0.025	1090	1750	1550	830	850	1.20	0.37
0.05	1085	1740	1600	820	850	1.25	0.38
0.1	1080	1740	1500	1010	1040	1.40	0.40
0.2	1085	1740	1500	1120	1150	1.60	0.40
0.4	1070	1720	1500	1220	1140	2.10	0.42
0.6	1075	1720	1500	1400	1500	2.64	0.42
0.8	1065	1720	1500	1440	1550	2.80	0.43
1.0	1060	1720	1500	1500	1650	3.22	0.42
1.5	1065	1720	1550	1500	1650	3.24	0.42
25.0	1060	1730	1550	1500	1700	3.24	0.43
50.0	1050	1730	1540	1500	1700	3.26	0.43
75.0	1045	1730	1550	1500	1700	3.28	0.43

Дар адабиёт [97] тадқиқи муфассали ҳулаҳои системаи мазкур дар доираи васеи консентратсия (0,0025-75%) оварда шудааст. Бо ин мақсад, алюминийи тамғаи А995 ва қалбағии тоза барои таҳлил истифода бурда шуд, ки дар оташдони озмоишии навъи СШОЛ гудохта шуданд.

Тадқиқот бо суръати потенциалии 10 мВ/с дар муҳити 3%-и маҳлули хлориди натрий гузаронида шуданд. Шохаҳои анодии қачхатҳои потенциодинамикӣ аз -2В ба самти мусбат то расидан ба потенциалҳои марбут ба пинҳосилкуни майл мекунад. Натиҷаҳои тадқиқот дар ҷадвали 1.17 оварда шудаанд.

Муқаррар карда шудааст, ки ҳангоми ба таркиби алюминий илова намудани қалъагӣ потенциали озоди зангзанӣ ба самти манфӣ мегузарад. Иловаҳои қалъагӣ ба миқдори то 1,5% самараноктар мебошанд. Дар муддати 60 дақиқа ҳосилшавии плёнкаи ғайрифабол ба амал меояд, ки аз миқдори қалъагӣ кам вобастагӣ дорад [98].

Иловаи қалъагӣ ба таркиби алюминий таъсири назаррас ба қиматҳои  $E_{п.о.}$  ва  $E_{реп}$  мерасонад. Тағйироти муҳим маҳз дар консентратсияи 0,1 %-и массаи қалъагӣ ба қайд гирифта шудааст. Бо афзоиш миқдори қалъагӣ, мавқеи нуқтаҳои марбут ба оғози пассиватсия ва пассиватсияи пурра дар қачхатаҳои потенциодинамикӣ, амалан бетағйир мемонанд.

**Рафтори анодии хӯлаҳои системаи Al - Pb.** Муаллифон [99] дар маҳлули 3%-и NaCl тадқиқоти электрохимиявии хӯлаҳои системаи Al-Pb (то 0,2%) гузаронидаанд. Ҷамъбасти натиҷаҳои тадқиқот дар ҷадвали 1.18 оварда шудааст.

Таҳлили динамикаи тағйирёбии потенциалҳои электродии хӯлаҳои системаи Al-Pb дар давоми 12 соат нишон медиҳад, ки тағйироти асосии потенциал дар як соати аввали таҳшинкунӣ ба амал меояд. Нигоҳдори минбаъдаи намунаҳо дар муҳити хлориди шадидан зангзананда қариб ки ба қимати потенциалӣ таъсир намерасонад. Таъсири вақти нигоҳдорӣ дар хӯлаҳои сурби тоза ночиз ба қайд гирифта шудааст.

**Ҷадвали 1.18** – Хусусиятҳои электрохимиявӣ (х.с.э.) ҳӯлаҳои алюминий бо сурб чавҳаронидашуда. Суръати эҳтимолии потенциал 10 мВ/с [99]:

Pb, %-и масса	-Ест. Дар 6 соат	-Енп	-Еп.п.	-Еп.ҳ.	-Ер.п.	$i_{нп}$	$i_{пп}$
	В					мА/см <sup>2</sup>	
-	985	1,700	1,420	0,680	0,720	1.90	0.48
0.0025	980	1,690	1,400	0,670	0,690	0,80	0,30
0.005	980	1,680	1,400	0,670	0,680	0,82	0,30
0.015	975	1,680	1,390	0,660	0,690	0,90	0,30
0.025	970	1,660	1,390	0,660	0,690	0,92	0,30
0.05	960	1,660	1,400	0,670	0,690	0,90	0,30
0.1	950	1,670	1,390	0,660	0,680	0,90	0,30
0.2	945	1,660	1,390	0,660	0,680	0,92	0,32

Иловаи сурб ба алюминий, бо дарназардошти ҳалшавандагии ками он, боиси каме ба самти мусбат тағйир ёфтани потенциали электрод мегардад. Дар ҳӯлаҳои алюминий-сурб, потенциалҳои питингҳосилкуни ва репассиватсия нисбат ба ҳӯлаҳои алюминий-қалъагӣ бештар ба самти мусбат ҷойгир шудаанд. Иловаи сурб инчунин зичии ҷараёно дар марҳилаи ибтидоии пассиватсия ба таври самаранок – қариб ду маротиба – коҳиш медиҳад. Ин падида бо ташаккули плёнкаи муҳофизатии зичтар дар рӯи ҳӯлаи алюминий-сурб нисбат ба ҳӯлаи алюминий-қалъагӣ вобастааст. Илова бар ин, бояд ба назар гирифт, ки шиддати ташаккули гидрогени зиёдтар дар рӯи сурб нисбат ба қалъагӣ ба таври назаррас баландтар аст [99].

**Рафтори анодии ҳӯлаҳои системаи Al - Вi.** Рафтори анодии ҳӯлаҳои системаи Al–Вi аз ҷониби Голубев В.И. ва Цыганкова Л.Е. омӯхта шуда, нишон дода шудааст, ки иловаи висмут ба алюминий боиси кам шудани суръати

зангзанӣ дар муҳити ишқорӣ мегардад, аммо дар муҳити турш пайдоиши питингхоро афзоиш медиҳад [100, 101]. Тибқи маълумоти қаблӣ, бо зиёд шудани миқдори висмут то 4,5% (масса), потенциали электроди хӯлаҳо то  $\approx -1,35$  В боло меравад. Бо вучуди ин, муқовимат ба зангзанӣ тамоюли коҳиш нишон медиҳад.

Рафтори анодии хӯлаҳои системаҳои Al-Vi - ро дар маҳлули 3% NaCl муаллифон [102] мавриди тадқиқ қарор доданд. Барои омода кардани хӯлаҳо алюминий бо тозагии 99,995% ва висмути навъи «тоза» истифода шуда, раванди гудозиш дар печҳои озмоишии навъи СШОЛ анҷом дода шудааст. Тафсилоти усулҳои таҷрибавӣ дар манбаи [7] муфассал шарҳ дода шудааст. Сабти қачхатҳои поляризацияи анодӣ бо суръати сканкунии 10 мВ/с сурат гирифтааст.

Дар ҷадвали 1.19 натиҷаҳои тадқиқоти муаллифон [7] ҷамъовари шудаанд. Нишон дода шудааст, ки хӯлаҳои дорои иловаҳои хурди висмут бо арзишҳои пасти зичии ҷараёни фарорасии пассиватсия ( $i_{н.п.}$ ) ва пассиватсияи пурра ( $i_{п.п.}$ ) хос мебошад. Бо зиёд шудани таркиби висмут дар алюминий, потенциали зангзании озод ( $-E_{св.к.}$ ), ташаккули питинг ( $E_{по}$ ) ва репассиватсия ( $E_{реп.}$ ) ба минтақаи манфӣ мегузарад. Дар айни замон потенциалҳои  $E_{по}$  ва  $E_{реп.}$  барои хӯлаҳои ки 4% Vi (масса) доранд ба минтақаи қиматҳои манфӣ мувофиқан дар 220, 275 ва 210, 230 мВ, нисбат ба алюминий ҷойгир мешавад [102].

Муайян карда шудааст, ки иловаи висмут ба алюминий дар ҳаҷми то 0,1 %- масса боиси коҳиши якбораи зичии кунунии фарорасии пассиватсия мегардад. Бо афзоиши минбаъдаи миқдори висмут то 4%, зичии ҷараёни пассиватсия ба таври назаррас меафзояд.

Мувофиқи маълумоти муаллифон [102], байни  $E_{стац}$  ва консентратсияи элементҳои ҷавҳарӣ, муносибати муайян вучуд дорад. Дар хӯлаҳои ки дар таркибашон миқдори ками висмут ( $<0,1$  мас. %) доранд, каме тағйирёбии

потенциали зангзанӣ ба сӯи арзишҳои мусбӣ мушоҳида мешавад. Аммо, бо афзоиши таркиби висмут дар хӯла, таъсири баръакс мушоҳида мешавад.

**Ҷадвали 1.19** – Параметрҳои зангзании (х.э.с.) хӯлаи алюминийӣ бо висмут чавҳаронидашуда дар муҳити электролитии 3%-и NaCl [102]:

В <sub>i</sub> , %-и масса	-Ек.оз	-Ен.п.	-Еп.п.	-Еп.	-Ер.п.	i <sub>н.в.</sub>	i <sub>п.п.</sub>
	В						
-	0.95	1.44	1.37	0.68	0.75	2.66	0.40
0.005	0.93	1.34	1.10	0.74	0.76	1.98	0.28
0.01	0.93	1.33	1.10	0.74	0.75	1.98	0.32
0.03	0.93	1.30	1.15	0.74	0.75	1.95	0.32
0.07	0.93	1.30	1.15	0.84	0.85	1.94	0.32
0.10	0.93	1.30	1.15	0.84	0.85	1.94	0.32
0.10	1.02	1.30	1.15	0.84	0.85	1.95	0.34
0.50	1.04	1.28	1.16	0.95	0.97	2.20	0.36
1.00	1.07	1.28	1.20	0.96	0.97	2.26	0.36
2.00	1.12	1.29	1.19	0.97	0.98	2.24	0.40
3.00	1.15	1.29	1.20	0.97	0.98	2.30	0.40
4.00	1.22	1.30	1.20	0.97	0.98	2.30	0.41

Қайд кардан зарур аст, ки чунин ҳодиса боиси тағйири потенциали ташаккули питинг ва инчунин ҷойивазкунии минтақаи ғайрифатоӣ ба самти манфӣ ва ба таври назаррас мегардад. Ин ҳолат хӯлаҳоро ҳамчун камустувор нисбат ба зангзанӣ тавсиф мекунад [102].

Муаллифон [103] дар маҷмӯъ ҳангоми чавҳаронидани алюминий бо висмут хусусиятҳои мувофиқро муайян кардаанд. Аз ҷумла, бо зиёдшавии миқдори элементи лигарӣ то 0,10% дар таркиби хӯла, коҳиши назарраси нишондиҳандаҳои ҷараёни зангзанӣ ба қайд гирифта шудааст.

Дар ҳолати афзоиши миқдори сурб ва висмут дар таркиби хӯла, зичии ҷараёни фарорасии пассиватсия баланд мешавад, ки ин ба камшавии муқовимат ба зангзанӣ сабаб мегардад.

**Рафтори анодии хӯлаи алюминийи системаи АЖ2,18 бо қалъагӣ, сурб ва висмут ҷавҳаронидашуда**

Тавре ки баррасии адабиёт нишон дод, иловаҳои оҳан ба алюминий ба муқовимат ба зангзанӣ ва қобилияти пластикии хӯла таъсири манфӣ мерасонанд. Дар асоси ин ва он, ки коркарди алюминий барои аз оҳан тоза кардан раванди меҳнатталаб ва сармояталаб буда, вариантҳои коркарди хӯлаҳо дар асоси системаи алюминию оҳани таркиби эвтектикӣ дошта баррасӣ карда шуд.

Натиҷаҳои омӯзиши рафтори анодии хӯлаи АЖ2,18 бо таркиби гуногуни қалъагӣ, сурб ва висмут ба даст оварда шудаанд, дар ҷадвали 1.20 оварда шудаанд.

**Ҷадвали 1.20** – Хусусиятҳои зангзанӣ-электрохимиявии хӯлаи алюминийи АЖ2,18, ки бо қалъагӣ, сурб ва висмут ҷавҳаронидашудаанд, дар муҳити электролити 3% NaCl:

Миқдори қалъагӣ дар таркиби хӯла, %-и масса	Потенциали электрохимиявӣ, В,(х.с.э.)				Суръати зангзанӣ	
	-Есв.к.	-Екор.	-Еп.о.	-Ереп.	І кор. А/м <sup>2</sup>	К·10 <sup>-3</sup> г/м <sup>2</sup> ·час
0.0	0.735	1.014	0.580	0.620	0.017	5.70
0.005Sn	0.970	1.035	0.650	0.730	0.013	4.35
0.05Sn	0.960	1.030	0.630	0.720	0.012	4.02
0.1Sn	0.950	1.226	0.640	0.725	0.045	15.07
0.5Sn	0.915	1.256	0.660	0.740	0.047	15.74
0.005 Pb	0.918	1.010	0.650	0.720	0.014	4.69
0.05 Pb	0.890	1.014	0.640	0.730	0.015	5.03
0.10 Pb	0.860	1.086	0.660	0.740	0.028	9.38
0.50 Pb	0.820	1.124	0.675	0.750	0.032	10.72
0.005 Bi	0.890	1.020	0.650	0.720	0.016	5.36
0.05 Bi	0.880	1.050	0.660	0.740	0.014	4.69
0.1 Bi	0.864	1.100	0.680	0.740	0.023	7.70
0.5 Bi	0.830	1.160	0.684	0.760	0.030	10.05

Хӯлаҳои тадқиқшудаи системаҳои  $\text{АЖ2.18\%Fe} - \text{Pb (Sn, Bi)}$ , ки дорои потенциали зангзанӣ дар ҳудуди  $-0,735$  то  $-0,820$  В мебошанд, бо ҷойивазкунии потенциали муҳофизатии  $0,820$  В фарқ мекунанд. Онҳо қобилияти таъмин кардани  $90-95\%$  дараҷаи муҳофизати ҷузъҳои пӯлодиро аз зангзанӣ доранд (ҷадвали 1.20).

### **1.5. Хулоса аз баррасии адабиёт ва масъалагузорӣ**

Алюминий ва хӯлаҳои он аз рӯи ҳаҷми истифода дар ҷаҳон баъд аз пӯлод дар ҷои дуум қарор дорад. Ин васеъистифодабари бо маҷмуи арзишманди хосиятҳои химиявӣ, физикӣ ва механикӣ, инчунин бо мавҷудияти фаровони захираҳои алюминий дар қабати замин асос меёбад. Сохтани хӯлаҳои нав ва татбиқи онҳо дар технология, инчунин истифодаи васеи алюминий ва хӯлаҳои он, зарурати тадқиқи амиқтари масоили марбут ба муқовимат ба зангзаниро ба миён меорад.

Бо дарназардошти маълумоти зикршуда, тасмим гирифта шуд, ки дар заминаи хӯлаи алюминийи  $\text{АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3}$ , ки бо иловаи қалъагӣ, сурб ва висмут ҷавҳаронида шудааст, тадқиқоти мушаххас гузаронида шавад. Ҳадафи асосӣ омӯзиши хосиятҳои физикӣ-химиявӣ ва механикии хӯла, аз ҷумла рафтори он дар шароити зангзанӣ-электрохимиявӣ, кинетикаи оксидшавӣ, гармиғунҷоиш вобаста ба ҳарорат ва таҳлили тағйироти функсияҳои термодинамикӣ мебошад.

Барои ноил шудан ба мақсади гузошташуда масъалаҳои зеринро ҳал кардан лозим аст: 1) тадқиқи гармиғунҷоиши хоси хӯлаи алюминийи  $\text{АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3}$  бо қалъагӣ, сурб ва висмут ҷавҳаронидашуда, вобаста аз ҳарорат; 2) гузаронидани ҳисобҳо оид ба тағйирёбии функсияҳои термодинамикии хӯлаи алюминийи  $\text{АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3}$  бо назардошти таъсири ҳарорат ва иловаи қалъагӣ, сурб ва висмут; 3) муайян намудани параметрҳои кинетикии раванди оксидшавии хӯлаи алюминийи  $\text{АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3}$  бо иловаи қалъагӣ, сурб ва висмут, дар муҳити гази оксиген; 4) таҳлили таркибии маҳсулоти оксидшавӣ ва муайян кардани нақши

хӯлаҳо дар ташакули механизми оксидшавии хӯлаҳо; 5) омӯзиши рафтори анодии хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо қалъагӣ, сурб ва висмут чавҳаронидашуда дар муҳити электролитии NaCl.

## **БОБИ 2. ГАРМИҶУНҶОИШ ВА ТАҒЙИРЁБИИ ФУНКСИЯҶОИ ТЕРМОДИНАМИКИИ ХҶЛАИ АЛЮМИНИИ АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 БО ҚАЛЪАҒИ, СУРЪ ВА ВИСМУТ ҶАВҶАРОНИДАШУДА ВОБАСТА АЗ ҶАРОРАТ [1]**

### **2.1. Схемаи дастгоҳ ва усулҳои ҷенкунии гармиғунҷоиши ҷисмҳои саҳт**

Солҳои охир талабот ба истеҳсол ва татбиқи масолеҳи навини конструксионӣ, ки дорои хосиятҳои баланди механикӣ ва муқовимати хуб ба зангзани нисбат ба масолеҳи анъанавӣ мебошад, рӯ ба афзоиш дорад. Дар ин замина, таҳия ва омӯзиши хӯлаҳои алюминий бо иловаи компонентҳои гуногуни ҷавҳарӣ, ки ба муҳити ғайри тобовар буда, қобилияти парокандасозии энергияи ларзишро низ доро мебошанд, аҳамияти хоса касб мекунад.

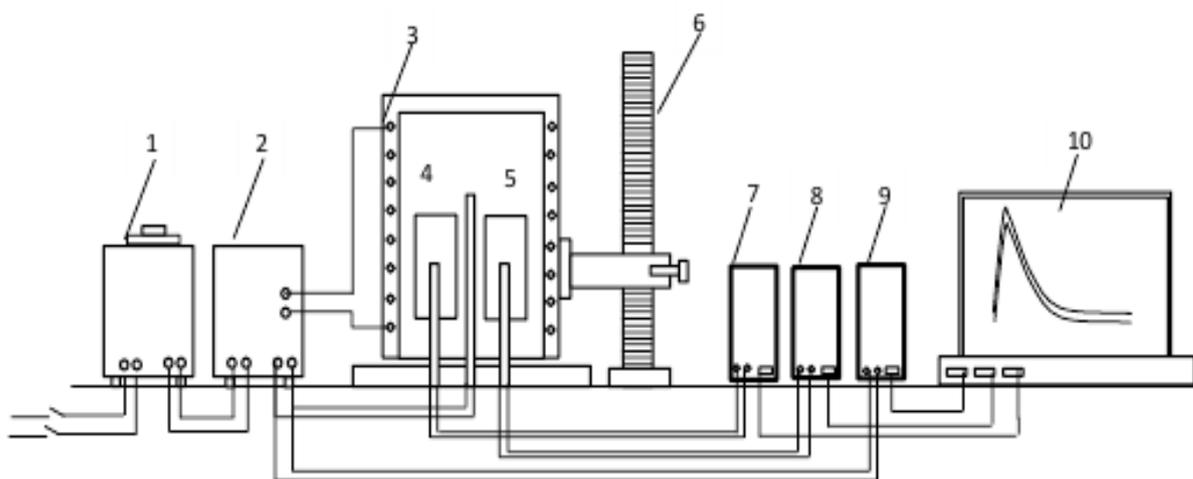
Аз тарафи дигар, оид ба омӯхтани гармиғунҷоишӣ металҳои холис, ки дар речаи хунуккунӣ ба даст оварда мешаванд, корҳои зиёд ба анҷом расонида шудааст. Дар ҳолати «гармкунӣ» тағйирёбии муътадили ҳарорат бинобар омилҳои зиёди беруна (монанди гармигузаронӣ, муҳити атроф, шиддат дар шабакаҳои таъминоти оташдон ва ғайра), душвор буда, таҷрибаҳо мураккаб мегарданд. Аз ин лиҳоз, омӯзиши намунаҳо дар речаи «хунукшавӣ» нисбатан содатар ва аз ҷиҳати амалисозӣ мувофиқтар шуморида [104, 105].

Муайян намудани гармиғунҷоиш одатан, дар дастгоҳи ИТС-400, ки барои омӯхтани гармиғунҷоиши хос вобаста аз ҳарорат таъйин шудааст, гузаронида мешавад [106].

Тадқиқоти гармиғунҷоишии металлҳо тибқи усулҳои, ки дар манбаъҳои адабӣ [107, 108] тавсия шудаанд, ва бо истифодаи таҷҳизоте, ки нақшаи он дар расми 2.1 оварда шудааст, иҷро карда шуд. Ин таҷҳизот ба калориметри динамикии навъи С бо қабати адиабатӣ ва ҳароратсанҷ таъя мекунад [108].

Дар расми 2.1 схемаи дастгоҳи ҷенкунии гармиғунҷоиши ҷисмҳои саҳт оварда шудааст, ки аз қисмҳои зерин иборат аст: оташдони барқӣ (3), ба стенд (6) насб карда шудааст ва имкони амудӣ ҳаракат карданро дорад (самти ҳаракат дар расм бо тирича нишон дода шудааст). Намунаи озмоишӣ (4) ва эталон (5)

шакли силиндри дошта, бо дарозии 30мм ва қутри 16 мм омода карда шудаанд; дар як канори онҳо сурохиё барои ҷойгиркунии термопарҳо (4 ва 5) пешбинӣ шудааст. Нугҳои термопарҳо ба термометри рақамии «DigiBil Multimeter DI9208L» (7, 8 ва 9) пайваस्त мешаванд. Оташдони барқӣ (3) тавассути автотрансформатори озмоишӣ (ЛАТР) (1) ба қор андохта шуда, бо истифода аз термостат (2) ҳарорати зарурӣ танзим карда мешавад. Пас аз муқаррар кардани қимати ибтидоии ҳарорат аз рӯи нишондиҳандаҳои термометрҳои рақамии "DigiBil Multimeter DI9208L", намунаи озмоишӣ (4) ва эталон (5) ба дохили оташдон ворид карда мешаванд ва то ҳарорати муайян гарм карда мешаванд. Ҳарорат дар вақти гармкунии тавассути компютер (10) назорат карда мешавад. Баъди ба ҳарорати дилхоҳ расидан, ҳар ду — намуна ва эталон — аз печи барқӣ хориҷ карда шуда, аз ҳамон лаҳза сабти тағйироти ҳарорат оғоз мегардад. Нишондиҳандаҳои термометрҳои рақамӣ дар компютер ҳар 10 сония сабт мешаванд ва ин раванди сабт то расидани ҳарорат ба зери 35°C идома меёбад.



**Расми 2.1 – Схеми дастгоҳи ченкунии гармиғунҷоиши ҷисмҳои саҳт дар речаи «хунуккунӣ»:**

1) автотрансформатор; 2) терморегулятор; 3) оташдони барқӣ; 4) Намунаи озмоишӣ; 5) эталон 6) дастаки оташдони барқӣ; 7) термометри рақамӣ барои ченкунии ҳарорат; 8) термометри рақамӣ таъйиноти умумӣ; 9) термометри рақамӣ барои эталон.

Ченкунии гармиғунҷоиш ба роҳи таҷрибавӣ дар ҳароратҳои гуногун яке аз усулҳои асосии муайян намудани хосиятҳои термодинамикии моддаҳо ба ҳисоб меравад. Дар раванди ҳисобкунии тағйирёбии энтропия ва энталпияи моддаҳо дар диапазони ҳарорати 0 то T, арзишҳои интегралҳои гармиғунҷоиш ҳамчун асос истифода мешаванд:

$$\left. \begin{aligned} [H^0(T) - H^0(T_0)] &= a(T - T_0) + \frac{b}{2}(T^2 - T_0^2) + \frac{c}{3}(T^3 - T_0^3) + \frac{d}{4}(T^4 - T_0^4); \\ [S^0(T) - S^0(T_0)] &= a \ln \frac{T}{T_0} + b(T - T_0) + \frac{c}{2}(T^2 - T_0^2) + \frac{d}{3}(T^3 - T_0^3) \end{aligned} \right\} (2.1)$$

Энергияи Гиббс:

$$[G^0(T) - G^0(T_0)] = [H^0(T) - H^0(T_0)] - T[S^0(T) - S^0(T_0)]. \quad (2.2)$$

Ченкунии гармиғунҷоиш ба принсипи интиқоли гармӣ асос ёфтааст, ки дар он ҷараёни гармӣ аз қисми марказии ҳисобкунаки гармӣ гузашта, барои гарм намудани ампулаи дорои намунаи санҷишӣ равона мегардад. Миқдори ҷараёни гармӣ аз рӯйи иқтидори гармигузаронии ҳисобкунаки гармӣ ва фарқи ҳарорат дар тӯли он ҳисоб карда мешавад. Ин параметрҳо қаблан дар асоси таҷрибаҳои калибрченкунии мустақил бо истифода аз намунаи стандартии мис муайян карда мешаванд. Диапазони ҳарорат то 550°C – ро дар бар мегирад. Дар ин усул хатогии асбоб аз 4% зиёд нест.

Барои муайян намудани гармиғунҷоиши хоси металлҳо қонуни хунуккунии Нютон – Рихманро истифода мебарем. Ҳамаи металлҳо, ки ҳарораташон аз ҳарорати муҳити атроф баландтар мебошанд, ба таври табиӣ хунук мешаванд. Суръати ин хунукшавӣ ба коэффитсиенти гармигузаронӣ ва гармиғунҷоишӣ қисм вобастагии мустақим дорад [109].

Бо мақсади муқоиса намудани қачхатҳои хунукшавии ду намунаи металии шакли якхела (силіндрӣ), ки яке эталон бо гармиғунҷоиш ва суръати хунукшавии маълум мебошад, таҳлил карда мешаванд. Дар асоси маълумоти эталон, мумкин аст гармиғунҷоиши намунаи озмоиширо тавассути ҳисоб кардани суръати хунукшавии он муайян намуд.

Чисме, ки қаблан гарм карда шудааст (бо массаи  $m$ ), ҳангоми хунук шудан то ҳарорати  $T$  миқдори муайяни гармӣ ( $\delta Q$ ) гум мекунад. Ин миқдорро метавон бо истифода аз формулаи зерин ҳисоб кард:

$$\delta Q = C_p^0 m dT, \quad (2.3)$$

дар ин ҷо  $C_p^0$  – гармиғунҷоиши хоси модда.

Бо назардошти он ки талафоти энергия тавассути сатҳи ҷисм руҳ медиҳад, миқдори гармие, ки  $dQ_s$  ҷисм дар давоми вақт  $d\tau$  тавассути сатҳи худ аз даст медиҳад, бо истифода аз формулаи зерин ҳисоб карда мешавад.

$$\delta Q_s = -\alpha(T - T_0) \cdot S d\tau. \quad (2.4)$$

Дар ин ҷо  $S$  - масоҳати сатҳ,  $\tau$ - вақт,  $T$ - гуногунии ҳарорати ҷисм ва  $T_0$  – ҳарорати муҳити атроф.

Дар ҳолати фарқи ҳарорати 1 К, коэффитсиенти гармидиҳӣ  $\alpha$  (Вт/(м<sup>2</sup> К)) ҳамеша доимӣ нест ва вобаста ба фарқи ҳарорат тағйир меёбад, аз ин рӯ он қонунияти тахминӣ дорад. Ҳангоми баррасии селайи гармӣ ҳамчун вектор, бояд дар назар дошт, ки он ба сатҳи ҳамвор, ки дар он ҳарорат яксон аст, амудӣ буда, миқдори гармии ба 1 м<sup>2</sup> дар як воҳиди вақт додасударо тавсиф мекунад. Ба селайи гармӣ якчанд омил таъсир мерасонанд, аз ҷумла: шакли геометрии ҷисм, ҳолати сатҳ ва самти ҷараён; речаи ҷараён ва навъи конвексия; навъи муҳити гармидиҳанда ва ҳарорати он. Аз ин рӯ, коэффитсиенти  $\alpha$  ҳамчун функцияи раванди гармидиҳӣ на ҳамчун арзиши ҷадвалӣ, балки танҳо тавассути таҷриба муайян карда мешавад.

Ҳангоми хунукшавии ҷисм ҳарорати ҳамаи нуқтаҳои он якхела тағйир меёбад, ва бо ифодаҳои зерин муайян карда мешавад:

$$\delta Q = dQ_s \text{ ва } C_p^0 m dT = \alpha(T - T_0) \cdot S d\tau. \quad (2.5)$$

Баробарии 2.5-ро ба намуди дигар навишта метавонем:

$$C_p^0 m \frac{dT}{d\tau} = \alpha(T - T_0) S. \quad (2.6)$$

Ҳисобҳо нишон доданд, ки бузургҳои  $C_p^0$ ,  $\rho$ ,  $\alpha$ ,  $T$  ва  $T_0$  дар фосилаи хурди ҳароратӣ бо координатаҳои нуқтаҳои сатҳи намуна вобастагӣ надоранд

ва ҳарорати онҳо ба ҳарорати муҳити атроф мутобиқ аст. Ифодаи 2.6 барои ду намуна дар шакли пешниҳод мегардад:

$$C_{p1}^0 m_1 S_2 \alpha_2 \left( \frac{dT}{d\tau} \right)_1 = C_{p2}^0 m_2 S_1 \alpha_1 \left( \frac{dT}{d\tau} \right)_2. \quad (2.7)$$

Ин баробарии барои ду намуна, ки яке эталон мебошад ва ҳарду дорои андозаҳои якхела ( $S_1=S_2$ ) ва сатҳи шабеҳ мебошанд, татбиқ мегардад. Дар ин маврид коэффитсиенти гармидиҳии онҳо ба  $\alpha_1 = \alpha_2$  баробар буда бо баробарӣ ба намуди зерин қабул карда шудааст:

$$C_{p1}^0 m_1 \left( \frac{dT}{d\tau} \right) = C_{p2}^0 m_2 \left( \frac{dT}{d\tau} \right). \quad (2.8)$$

Аз ин баробарӣ гармиғунҷоиши хос  $C_p^0$ , суръати хунуккунӣ  $\left( \frac{dT}{d\tau} \right)_2$  намунаҳои озмоишӣ ва вазни онҳоро ( $m_1$  ва  $m_2$ ) истифода намуда, гармиғунҷоиши ҳиссаҳои  $C_p^0$  бо ифодаи зерин ҳисоб менамоем:

$$C_{p2}^0 = C_{p1}^0 \frac{m_1}{m_2} \left( \frac{dT}{d\tau} \right)_1 / \left( \frac{dT}{d\tau} \right)_2. \quad (2.9)$$

Муаллифон [49, 50] вобастагии ҳарорати гармиғунҷоиши намунаҳои мис ва алюминийро бо усули мазкур муқаррар намудаанд. Натиҷаҳои бадастомада бо маълумоти дар адабиёт мавҷудбуда мувофиқат намуда, истифодаи ин усулро асоснок мекунад [1].

Дар қадвали 2.1 дақиқтарин функцияҳои термодинамикии алюминийи дар диапазони ҳарорат аз 300К то 800К, мувофиқи [110, 111] нишон дода шудааст. Дар қадвали мазкур барои муқоиса маълумоти таҷрибавии гармиғунҷоиши бадастovarдаи дигар муаллифон, нишон дода шудааст.

Қимати миёнаи гармиғунҷоиши хоси алюминийи А5N, ки муаллифон [112] бо усули калориметрӣ чен кардаанд (дар ҳудуди 303-371 К) 826,14 Ҷ/(кг·К) ва ҳангоми ҳисоб кардани формулаи (2,9) ба 892,4 Ҷ/ (кг·К) баробар мешавад.

**Ҷадвали 2.1** – Гармиғунҷоиши хоси (Дж)/(кг·К)) алюминийи тағайи А5N аз тарафи муаллифони гуногун пешниҳод карда шудаанд:

T, K	[49]	[50]
300	854.62	985
400	949.48	1020
500	1044.58	1085
600	1132.48	1140
700	1205.74	-
800	1256.92	-

Муқаррар карда шудааст, ки баробари баланд шудани дараҷаи тозагии алюминий қобилияти гармиғунҷоиши хоси он зиёд мешавад. Масалан, гармиғунҷоиши хоси алюминий бо дараҷаи тозагии махсус ба 1256,92 Ҷ/(кг К) баробар аст. Дар ҷадвали 2.2 арзёбии муқоисавии қиматҳои термодинамикии алюминийи тағайи А5N бо қиматҳои алюминийи тоза оварда шудааст [113]. Ҷй тавре маълум аст, ҳангоми кам шудани миқдори ғайи энергияи Гиббс, энтропия ва энталпия кам мешавад.

Барои тадқиқи гармиғунҷоишӣ ҳулаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо калъагӣ, сурб ва висмут то 0,5 %-и вазн ҷавҳаронидашуда, намунаҳо дар оташдони тағайи СШОЛ гирифта шудааст. Миқдори калъагӣ, сурб ва висмут дар таркиби ҳулаҳо бо истифода аз микроанализатор ва микроскопи электрони Корейи Ҷанубӣ, силсилаи AIS-2100 муайян карла карда шуд. Намунаҳои тадқиқшаванда дар шакли цилиндр бо андозаҳои баландиашон 30 мм ва қутрашон 16 мм омода карда шуданд.

Дар таркиби ҳулаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 металлҳои зерин мавҷуданд: Fe -2.4 % - мас.; Cu – 5.3 % - мас.; Mg-1.1% - мас.; Zn – 4 % - мас.; Si-3% - мас.

**Ҷадвали 2.2** - Қиматҳои муқоисавии функсияҳои термодинамикӣ барои алюминийи тамғаи А5N ва алюминийи тоза:

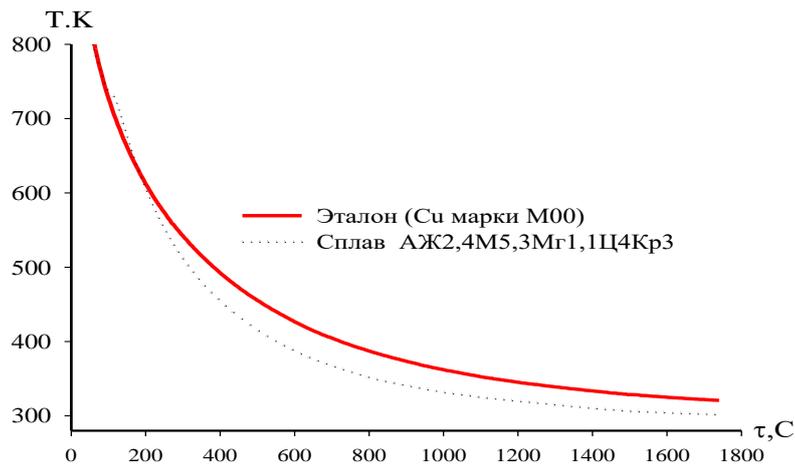
Т, К	[H <sup>(T)</sup> -H <sup>(0)</sup> ], Қ/моль		ΔS(T), Қ/моль		ΔG(T), Қ/моль	
	Al [82]	Al тамғаи А5N	Al [83]	Al тамғаи А5N	Al [82]	Al тамғаи А5N
300	4.610	6.098	28.501	103.81	13.134	-23.20
400	7.117	8.397	35.703	110.77	17.911	-31.21
500	9.738	11.089	41.547	116.74	22.072	-38.07
600	12.473	14.030	46.531	122.07	25.743	-43.28
700	15.340	17.190	50.948	126.91	29.033	-46.32
800	18.365	20.520	54.984	131.31	32.028	-46.71

## **2.2. Гармиғунҷоиш ва функсияҳои термодинамикӣ ҳӯлаҳи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3, вобаста аз ҳарорат [М1]**

Тадқиқи гармиғунҷоиш ва функсияҳои термодинамикии ҳӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 вобаста аз ҳарорат мувофиқи усули дар банди 2.1 тавсифшуда гузаронида шудааст [114].

Қаҷҳаттаҳои вобастагии ҳарорат аз суръати хунуккунии ҳӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3, ки дар натиҷаи тадқиқот ба даст овардашудааст дар расми 2.2 нишон дода шудааст. Вобастагии ҳосилшудаи қаҷҳаттаи хунуккунии ҳӯлаҳо бо ифодаи зерин ҳисоб карда мешавад:

$$T = T_0 + \frac{1}{2} [(T_1 - T_0) e^{-\tau/\tau_1} + (T_2 - T_0) e^{-\tau/\tau_2}]. \quad (2.10)$$

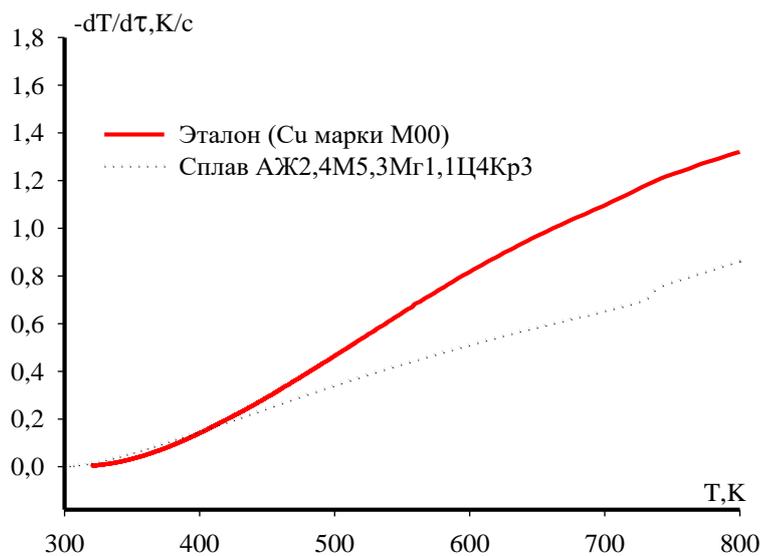


**Расми 2.2** – Графики тағйирёбии ҳарорати намуна вобаста аз вақти хунукшавӣ барои хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 [М1]

Муодилаи дифференсиалии (2.10) ва  $\tau$ -ро истифода намуда, дигар намуди муодиларо барои муайян намудани суръати хунукшавии хӯлаҳо ба даст овардем:

$$\frac{dT}{d\tau} = \frac{1}{2} \left[ -\left(\frac{T_1 - T_0}{\tau_1}\right) e^{-\tau/\tau_1} - \left(\frac{T_2 - T_0}{\tau_2}\right) e^{-\tau/\tau_2} \right]. \quad (2.11)$$

Бо истифода аз муодилаи (2.11) суръати хунукшавии намунаҳои хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 ҳисоб карда шуд, ки натиҷаи он дар расми 2.3 ба намуди графикӣ нишон дода шудааст.



**Расми 2.3** – Суръати хунукшавии хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 ва эталон (Cu тамғайи M00) вобаста аз ҳарорат [М1]

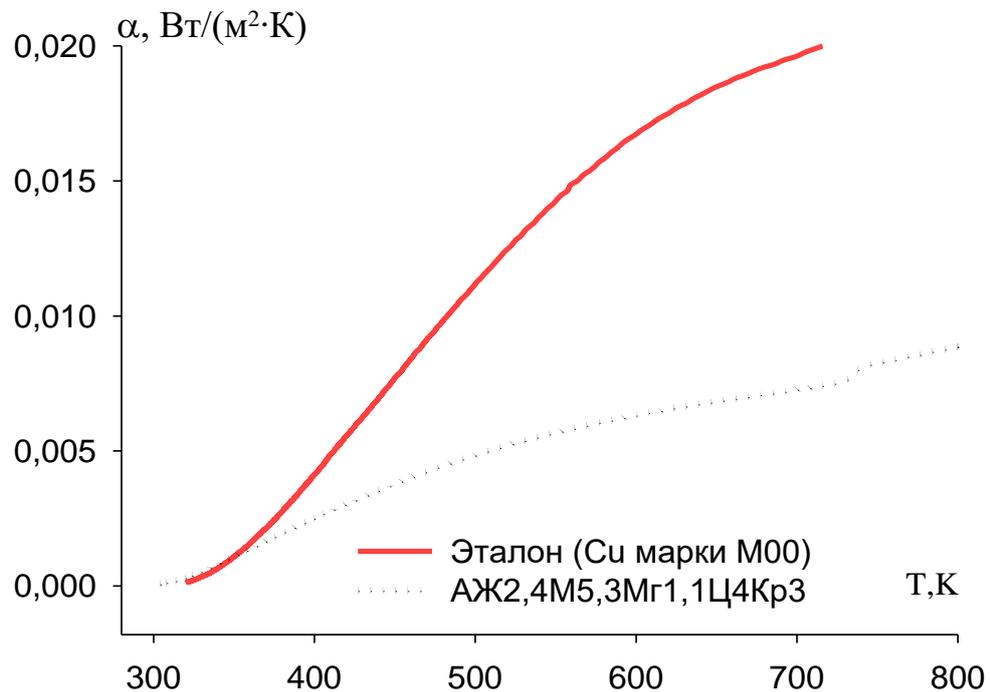
Бо истифода аз натиҷаҳои ҳисобшудаи суръати хунукшавӣ ва коэффисиенти гармигузаронии  $\alpha(T)$  барои намунаҳо, гармиғунҷоиши хоси хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3, ки бо қалъагӣ чавҳаронида шудааст ва эталон (мис бо тамғаи М00) бо истифода аз ифодаи (2.12) ҳисоб карда шуд.

$$\alpha = \frac{cm \frac{dT}{dt}}{(T-T_0) \cdot S}, \quad (2.12)$$

Дар ин ҷо  $T$  ва  $T_0$  – мувофиқан ҳарорати намуна ва муҳити атроф,  $S$  ва  $m$  – масоҳати сатҳ ва массаи намуна.

Коэффитсиенти гармигузарони вобаста аз ҳарорат барои хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 дар расми расми 2.4 оварда шудааст:

$$|\alpha(T)| = -12.5597 + 0.0605T - 7.6352 \cdot 10^{-5}T^2 + 9.4713 \cdot 10^{-8}T^3. \quad (2.13)$$

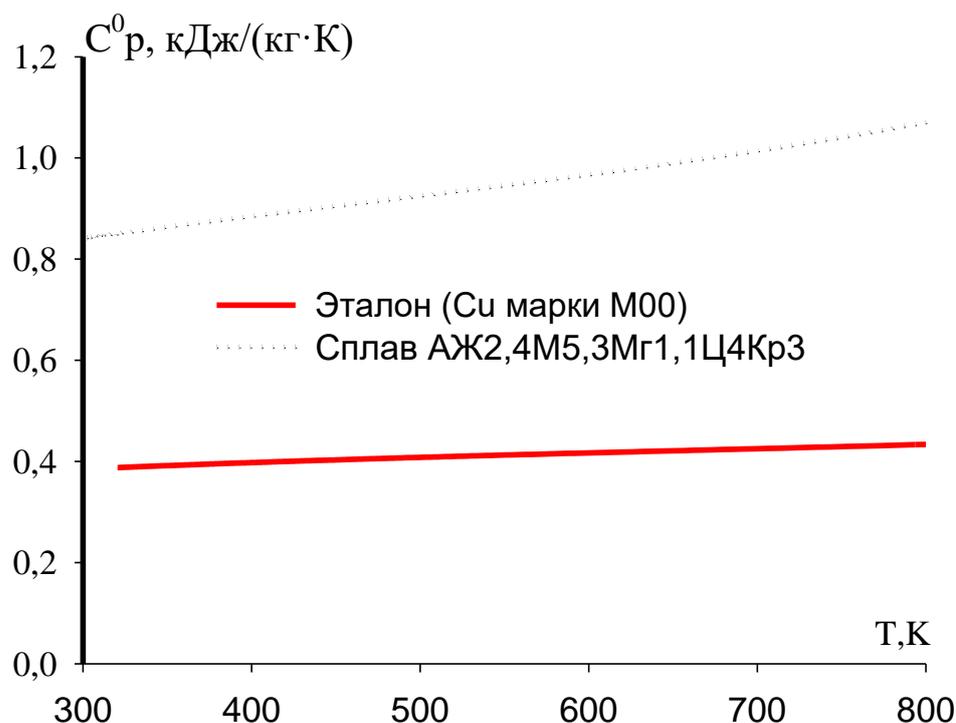


**Расми 2.4.** – Коэффитсиентӣ гармигузаронии хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 ва эталон (Cu марки (M00), вобаста аз ҳарорат [M1]

Дар натиҷаи тадқиқот (суръати хунукшавии намуна ба ҳисоб гирифта

шудааст) барои муайян намудани гармиғунҷоишӣ хос вобаста аз ҳарорат барои хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 дар фосилаи ҳарорати 300-800К формулаи зерин ба даст оварда шуд:

$$C_p^0_{\text{АЖ2,4М5,3Мг1,1Ц4Кр3}} = 0.6579 + 0.0008241T - 9.0895 \cdot 10^{-7}T^2 + +6.5293 \cdot 10^{-10}T^3 \quad (2.14)$$



**Расми 2.5** – Гармиғунҷоиши хоси хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 ва эталон (Cu тамғай (M00)), вобаста аз ҳарорат [M1]

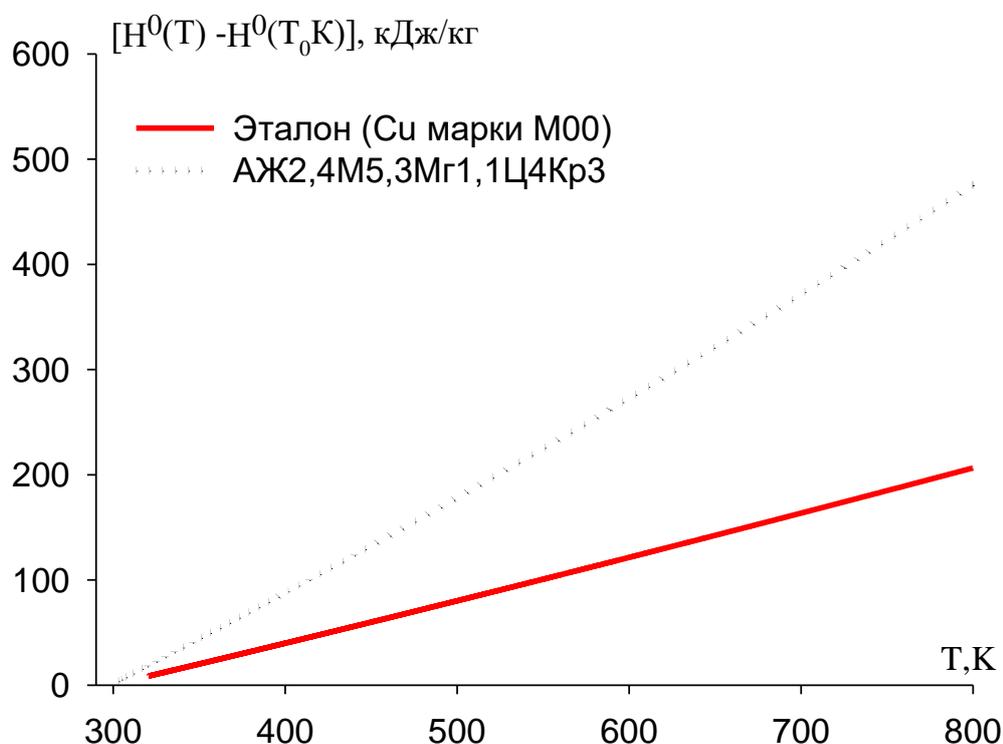
Барои ҳисоб кардани вобастагии тағйирёбии энергияи Гиббс, энталпия ва энтропия аз ҳарорат, интегралҳо аз гармиғунҷоиши хос истифода шудааст (кДж/(кг·К)):

$$[H^o(T) - H^o(T_0)] = a(T - T_0) + \frac{b}{2}(T^2 - T_0^2) + \frac{c}{3}(T^3 - T_0^3) + \frac{d}{4}(T^4 - T_0^4); \quad (2.15)$$

$$[S^o(T) - S^o(T_0)] = a \ln \frac{T}{T_0} + b(T - T_0) + \frac{c}{2}(T^2 - T_0^2) + \frac{d}{3}(T^3 - T_0^3) \quad (2.16)$$

$$[G^o(T) - G^o(T_0)] = [H^o(T) - H^o(T_0)] - T[S^o(T) - S^o(T_0)]. \quad (2.17)$$

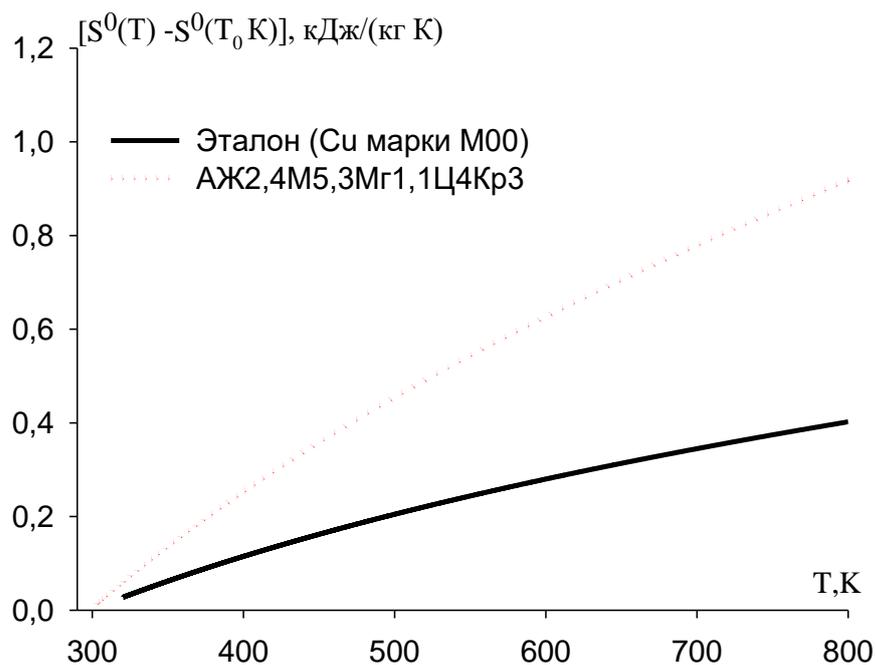
Дар расмҳои 2.6-2.8 графикаи тағйирёбии энергияи Гиббс (Дж/моль), энталпия (кДж/кг) ва энтропия (Дж/(моль·К)) вобаста аз ҳарорат барои ҳулаҳои алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 ва эталон (Cu марки (М00)) нишон дода шудааст:



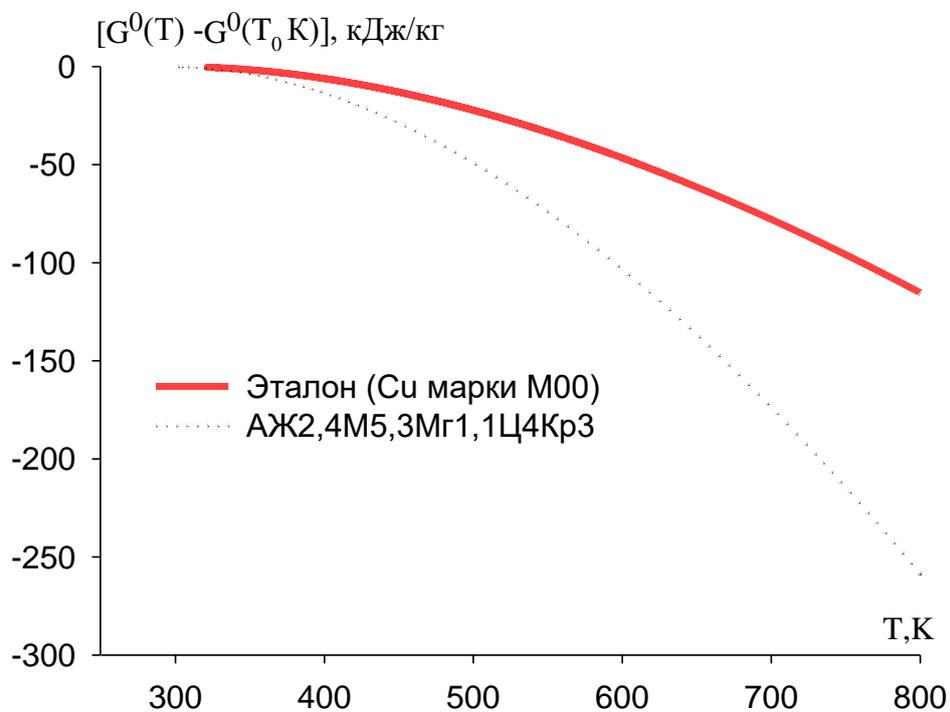
**Расми 2.6** – Графикаи тағйирёбии энталпия (кДж/кг) вобаста аз ҳарорат, барои ҳулаи алюминий АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 ва эталон (Cu тамғаи (М00))

Дар натиҷаи баланд шудани ҳарорат гармиғунҷоиши хос, коэффитсенти гармиғузaronӣ, тағйирёбии энталпия ва энтропияи ҳулаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 зиёд шуда тағйирёбии энергияи Гиббс кам мешавад.

Дар натиҷа муодилаҳои ҳосилшудаи функцияҳои термодинамикӣ вобаста аз ҳарорат ва хусусиятҳои физикаи гармо барои ҳулаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо дақиқии  $R_{корр} = 0.999$  – ро тавсиф менамояд:



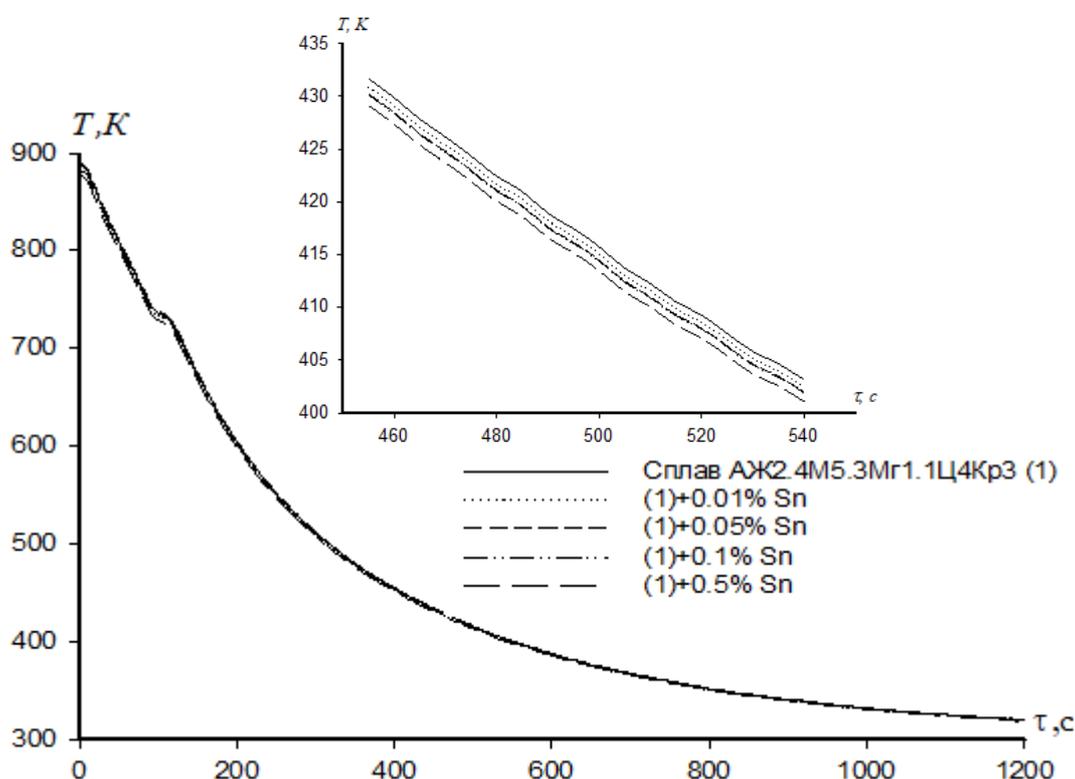
**Расми 2.7**– Графики тағйирёбии энтропия (Дж/(моль·К)) вобаста аз ҳарорат, барои хўлаи алюминий АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 ва эталон (Cu тамғаи (M00))



**Расми 2.8**– Графики тағйирёбии энергияи Гиббс (Дж/моль) вобаста аз ҳарорат, барои хӯлаи алюминий АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 ва эталон (Cu тамғаи (M00))

### 2.3. Гармиғунҷоиш ва функсияҳои термодинамикии хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3МГ1.1Ц4КР3 бо қалъагӣ

Дар расми 2.9 натиҷаҳои тадқиқоти вобастагии ҳарорати намуна аз вақт барои хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо қалъагӣ чавҳаронидашуда ва эталон (Cu тамғаи (M00)) оварда шудааст:



**Расми 2.9**– Вобастагии ҳарорат аз вақти хунукшавӣ барои хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо қалъагӣ чавҳаронидашуда ва эталон (Cu тамғаи (M00))

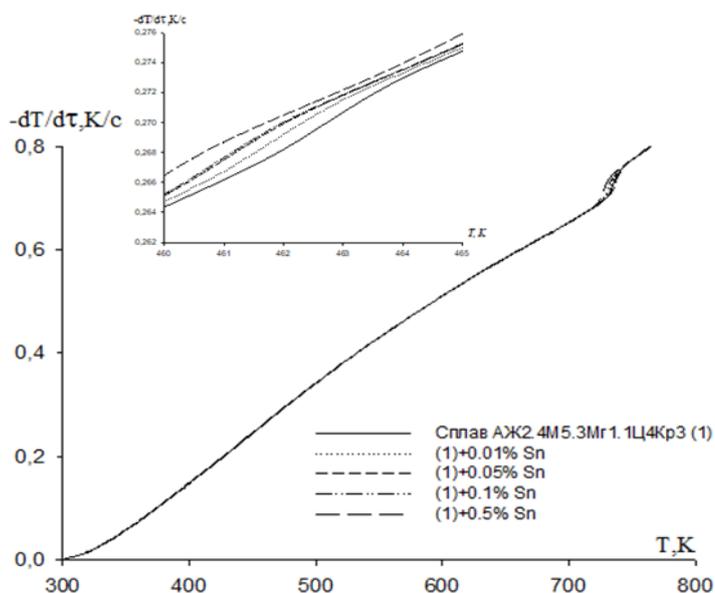
Суръати хунукшавии намунаҳои хӯлаи мазкурро бо истифода аз муодилаи дифференсиалии (2.10) ҳисоб гардида, дар шакли графикӣ дар расми 2.10 тасвир ёфтааст.

Қадвали 2.3 қиматҳои таҷрибавии коэффитсиентҳои  $\Delta T_{01, \tau_1}$  ва  $\Delta T_{02, \tau_2}$  – ро барои хӯлаҳои тадқиқшуда тибқи муодилаи (2.11) дар бар мегирад.

Натиҷаҳои таҷрибавӣ бо истифода аз барномаи MS Excel таҳлил гардида, графикҳо дар барномаи SigmaPlot сохта шудаанд. Бузургии коэффитсиенти коррелясионӣ дар ҳамаи ҳолатҳо на камтар аз 0,998 ба даст омадааст.

**Ҷадвали 2.3** – Қимати коэффитсиентҳои  $\Delta T_1, \tau_1, \Delta T_2, \tau_2$  формулаи 2.11 барои хӯлаи алюминий АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо қалъагӣ чавҳаронидашуда ва эталон (Cu марки (M00)):

Миқдори қалъагӣ дар хӯлаи алюминий %-вазн	$\Delta T_1, K$	$\tau_{1,c}$	$\Delta T_2, K$	$\tau_{2,c}$	$\Delta T_1/\tau_1, K/c$	$\Delta T_2/\tau_2, K/c$	$\Delta T_0, K$
0,00	309,37	280,71	283,21	280,68	1,10	1,01	315,40
+0,01	307,822	280,71	281,79	280,67	1,10	1,00	315,19
+0,05	310,60	280,71	284,32	280,68	1,11	1,01	315,56
+0,1	307,16	280,71	281,18	280,68	1,09	1,00	315,10
+0,5	304,42	280,71	278,67	280,68	1,08	0,99	314,72



**Расми 2.10** – Суръати хунукшавии намунаҳо аз хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо қалъагӣ чавҳаронидашуда ва эталон (Cu тамғаи (M00)), вобаста аз ҳарорат

Бо коркарди маълумоти таҷрибавӣ ва маълумоти адабиёт нисбат ба гармиғунҷоиши алюминийи холис, оҳан, қалъагӣ, инчунин хӯлаи алюминий АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо қалъагӣ ҷавҳаронидашуда барномаи SigmaPlot ва формулаи 2.14 - ро истифода намуда формулаи вобастагии гармиғунҷоиши хос аз ҳароратро барои хӯлаи алюминий АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 ва хӯлаҳои бо қалъагӣ ҷавҳаронидашуда бадаст овардем (коэффитсенти коррелятсия дар қавс нишон дода шудааст):

$$C_p^{0\text{АЖ2,4М5,3Мг1,1Ц4Кр3}} = 0.6579 + 0.0008241T - 9.0895 \cdot 10^{-7}T^2 + +6.5293 \cdot 10^{-10}T^3;$$

(R=0,999)

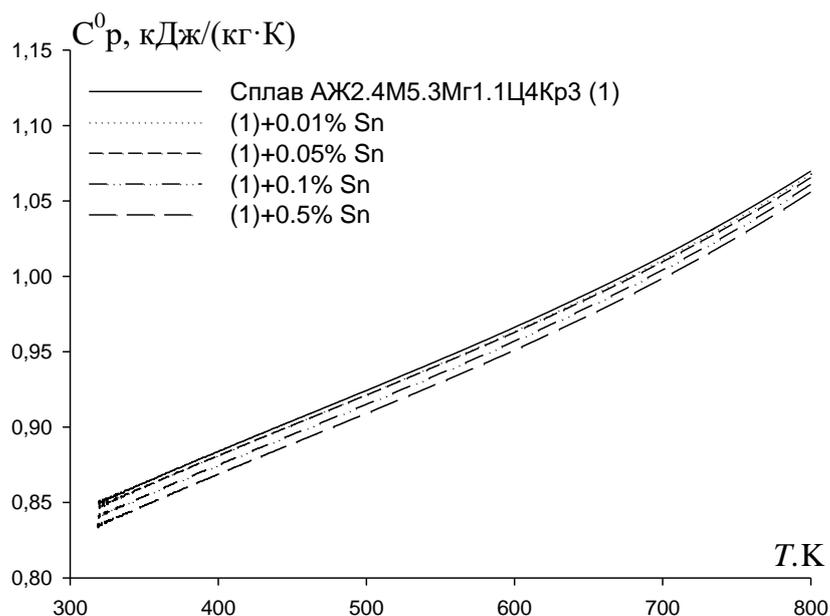
$$C_p^{0Sn} = 141.0839 + 0.5869T - 1.3885 \cdot 10^{-3}T^2 + 1.3923 \cdot 10^{-6}T^3.$$

(R=1,0000)

Қиматҳои ҳисобшудаи гармиғунҷоиши хоси  $C_p^0$  барои хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо иловаи қалъагӣ, баъд аз ҳар 100К, дар ҷадвали 2.4 ва расми 2.9 оварда шудаанд.

**Ҷадвали 2.4** – Гармиғунҷоиши хоси (Дж/(кг·К)) хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо қалъагӣ ҷавҳаронидашуда, вобаста аз ҳарорат:

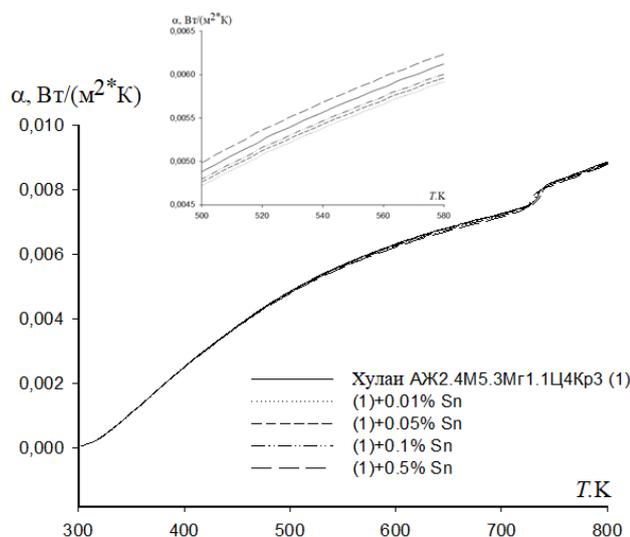
Миқдори қалъагӣ дар хӯла, %-вазн	Ҳарорат, К					
	300	400	500	600	700	800
0.00	0,8411	0,8839	0,9243	0,9661	1,0134	1,0698
0.01	0,8387	0,8815	0,9220	0,9640	1,0115	1,0683
0.05	0,8388	0,8813	0,9215	0,9631	1,0099	1,0657
0.1	0,8325	0,8751	0,9154	0,9572	1,0045	1,0612
0.5	0,8261	0,8686	0,9089	0,9508	0,9983	1,0554
Зиёдшавии $C_p^0$ , %	-1,83	-1,75	-1,69	-1,62	-1,51	-1,37



**Расми 2.11** – Гармиғунҷоиши хоси (Дж/(кг·К)) хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо қалъагӣ чавҳаронидашуда, вобаста аз ҳарорат

Сипас, қиматҳои таҷрибавии суръати хунукшавии намунаҳо ва натиҷаҳои ҳисобшудаи гармиғунҷоиши хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо қалъагӣ чавҳаронидашударо истифода намуда коэффитсиентӣ гармигузаронӣ ( $\alpha$ , Вт/К·м<sup>2</sup>) вобаста аз ҳарорат, ҳисоб намудем.

Натиҷаҳо дар расми 2.10 нишон дода шудааст.



**Расми 2.12** – коэффитсиентӣ гармигузаронӣ ( $\alpha$ , Вт/К·м<sup>2</sup>) хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо қалъагӣ ва эталон (Cu тамғаи (М00)) вобаста аз

ҳарорат

Бо истифода аз барномаи SigmaPlot ва формулаи 2.9 коэффитсиентҳои дар зер овардашударо барои формула (2.19), ва муайян намудани гармиғунҷоиши хос вобаста аз ҳарорат барои хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 ва хӯлаҳои бо қалъагӣ ҷавҳаронидашуда бадаст овардем. Қиматҳои коэффитсиентҳо дар ҷадвали 2.6 оварда шудаанд.

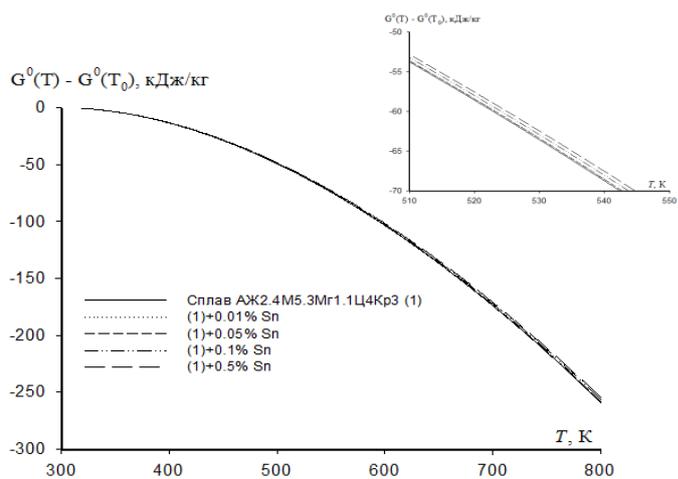
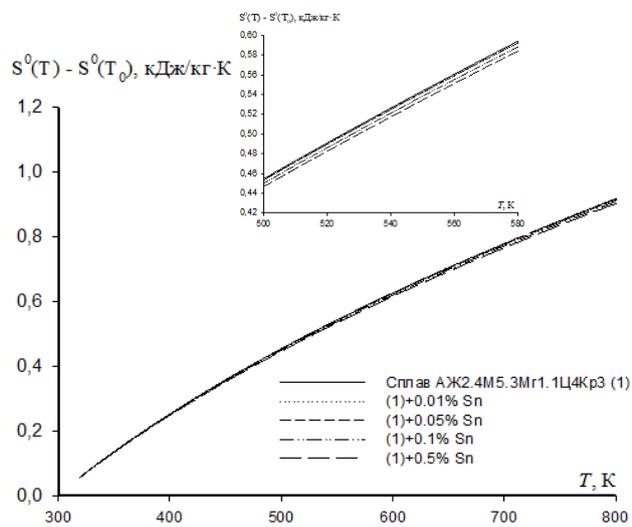
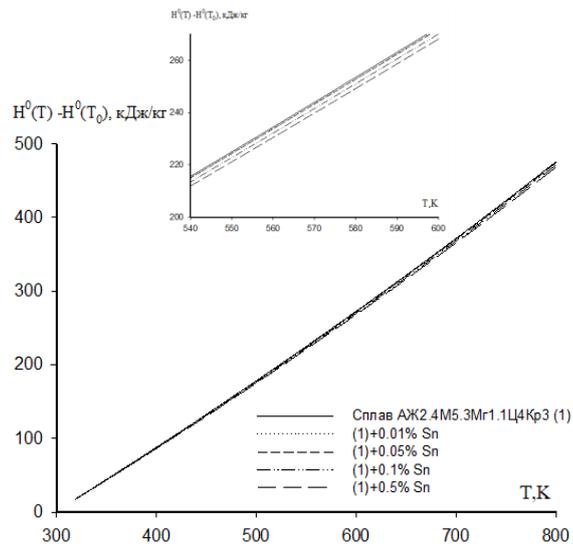
$$c_p^0 = a + bT + cT^2 + dT^3 \quad (2.19)$$

Ҳангоми ҳисоб кардани тайғирёбии энталпия, энтропия ва энергияи Гиббс вобаста аз ҳарорат бо истифода аз муодилаҳои (2.15), (2.16), (2.17) интегралҳои гармиғунҷоиши хос истифода мешаванд, ки мувофиқи ифодаи (2.19) қиматҳои коэффитсиентҳо дар ҷадвали 2.5 оварда шудааст.

**Ҷадвали 2.5** – Бузургиҳои коэффитсиентҳои a, b, c, d барои хӯлаи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо қалъагӣ ва эталон ки дар муодилаи 2.17 истифода мешаванд:

Миқдори олова дар хӯла, %-вазн	A	$b \cdot 10^{-4}$	$c \cdot 10^{-7}$	$d \cdot 10^{-9}$	Коэффитсиенти коррелятсии R
0.00	0,6605	8,10	-8,85	0,640	1,00
0.01	0,6575	8,14	-8,94	0,648	1,00
0.05	0,6595	8,03	-8,73	0,630	1,00
0.1	0,6520	8,11	-8,92	0,647	1,00
0.5	0,6450	8,16	-9,06	0,659	1,00

Дар ҷадвали 2.6 ва расми 2.13 натиҷаҳои ҳисобии тағйирёбии энталпия, энтропия ва энергияи Гиббс барои хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо қалъагӣ ҷавҳаронидашуда ва эталон (Cu марки М00) пас аз ҳар 100К оварда шудааст. Чи тавре, ки маълум аст (ҷадвали 2.6 ва расми 2.13) бо зиёд шудани ҳарорат бузургиҳои энталпия ва энтропияи хӯлаҳо афзуда бузургии энергияи Гиббс коҳиш меёбад. Бо зиёд гардидани миқдори иловаи қалъагӣ дар хӯлаи аввала бузургиҳои энталпия ва энтропияи кам гардида, энергияи Гиббс меафзояд.



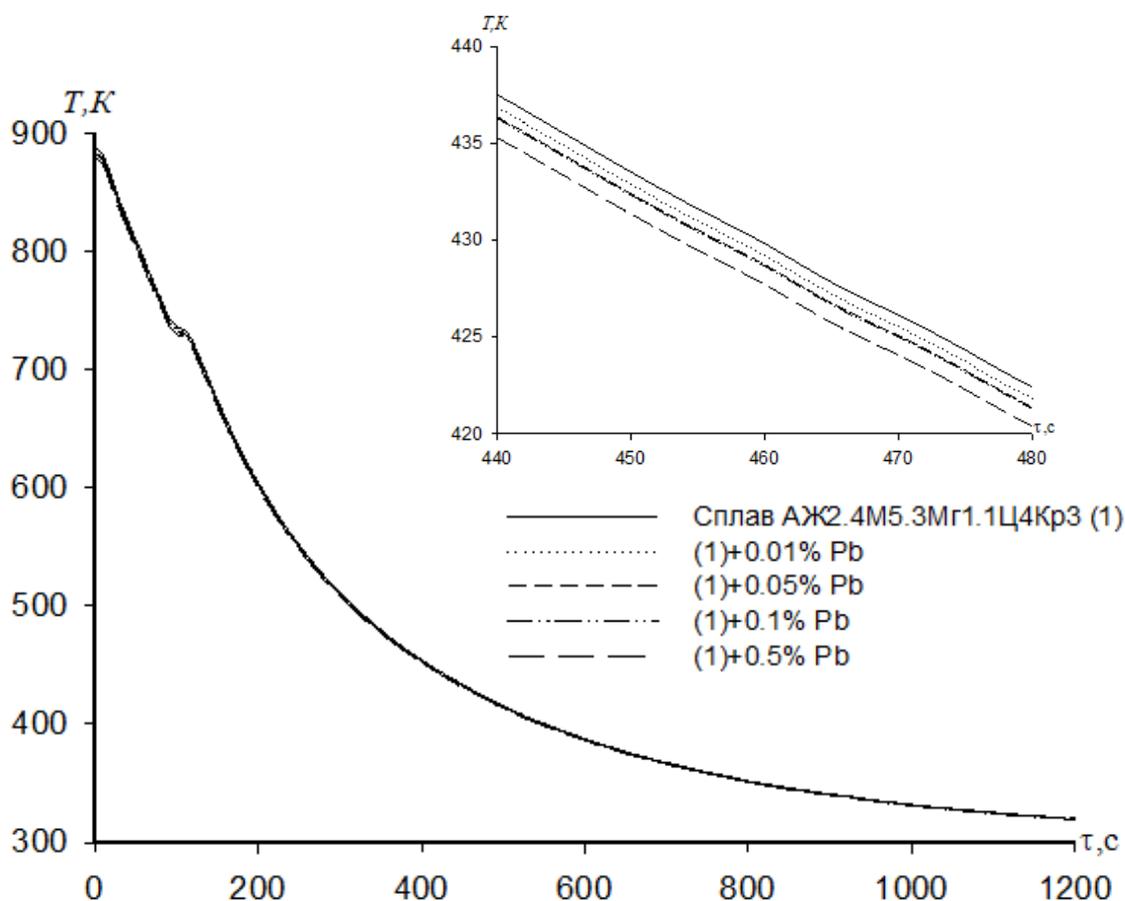
**Расми 2.13** – Тағйирёбии функцияҳои термодинамикӣ ҳулаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо қалъагӣ чавҳаронидашуда

**Ҷадвали 2.6** – Тағйирёбии функцияҳои термодинамикӣ ҳулаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо қалъагӣ ҷавҳаронидашуда:

Т, К	Хула АЖ2.4М5.3 Мг1.1Ц4Кр3	+0.01% Sn	+0.05% Sn	+0.1% Sn	+0.5% Sn
	$[H^0(T) - H^0(T_0^*)], \text{кДж/кг}$				
300	1,5553	1,5509	1,5511	1,5393	1,5274
400	87,8403	87,5999	87,5953	86,9536	86,2966
500	178,2493	177,7797	177,7411	176,4799	175,1738
600	272,7403	272,0519	271,9433	270,0810	268,1266
700	371,6553	370,7669	370,5351	368,1080	365,5174
800	475,7203	474,6639	474,2273	471,3003	468,1046
$[S^0(T) - S^0(T_0^*)], \text{кДж/кг} \cdot \text{К}$					
300	0,0052	0,0052	0,0052	0,0051	0,0051
400	0,2531	0,2524	0,2524	0,2506	0,2487
500	0,4547	0,4535	0,4534	0,4502	0,4468
600	0,6269	0,6253	0,6250	0,6207	0,6162
700	0,7793	0,7773	0,7769	0,7717	0,7662
800	0,9181	0,9160	0,9153	0,9094	0,9031
$[G^0(T) - G^0(T_0^*)], \text{кДж/кг}$					
300	-0,0048	-0,0048	-0,0048	-0,0048	-0,0047
400	-13,4128	-13,3755	-13,3757	-13,2765	-13,1754
500	-49,1044	-48,9710	-48,9668	-48,6105	-48,2447
600	-103,3810	-103,1060	-103,0880	-102,3510	-101,5900
700	-173,8220	-173,3710	-173,3220	-172,1070	-170,8430
800	-258,7840	-258,1290	-258,0270	-256,2570	-254,4000

## 2.4. Хусусиятҳои теплофизикӣ ва функсияҳои термодинамикии хӯлаи алюминий АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо сурб чавҳаронидашуда

Бо истифода аз усули дар фасли 2.1 тавсифшуда, қачхатҳои суръати хунукшавии намунаҳо аз хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо сурб чавҳаронидашуда вобаста ба вақт муайян намуда дар расми 2.14 нишон дода шудааст.



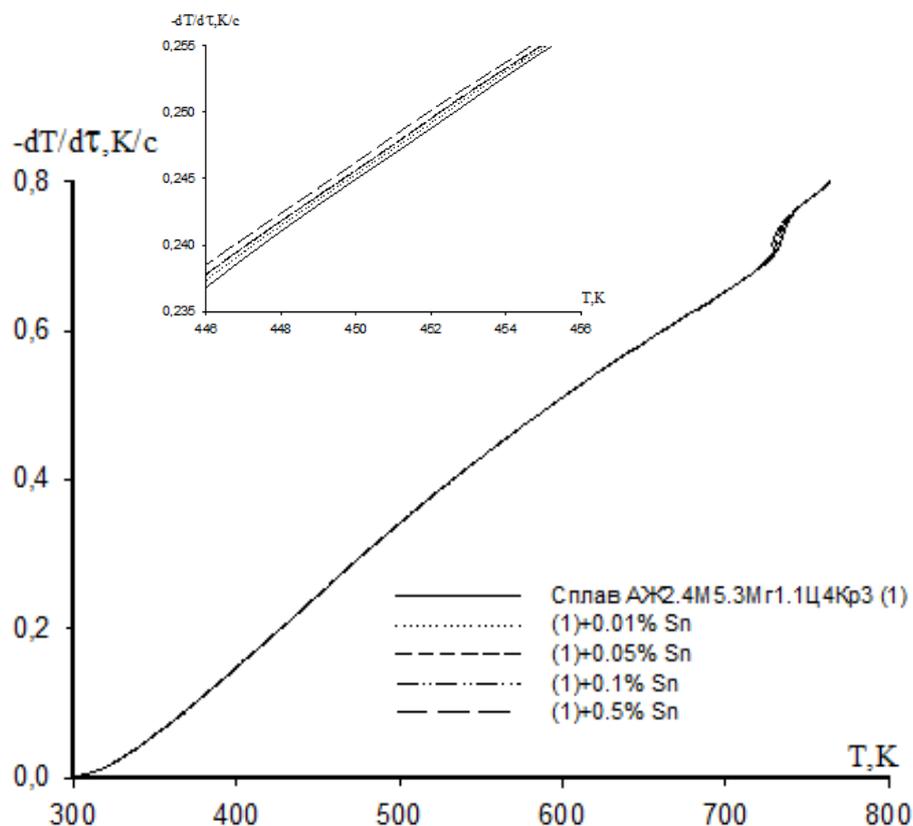
**Расми 2.14** – Графики вобастагии ҳарорати намунаҳои хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо сурб чавҳаронидашуда аз вақти хунуккунӣ.

Бо истифода аз муодилаи (2.11) суръати хунукшавии намунаҳоро ҳисоб намудем. Дар ҷадвали 2.7 барои ҳулаҳои озмоишӣ бузургии коэффитсиентҳое, ки дар муодилаи (2.11) истифода бурда мешаванд, оварда шудаанд.

**Ҷадвали 2.7** - Қиматҳои коэффициентҳои  $\Delta T_{01}$ ,  $\tau_1$ ,  $\Delta T_{02}$ ,  $\tau_2$  дар муодилаи (2.11) барои хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо сурб ҷавҳаронидашуда:

Миқдори сурб дар хӯла, мас.%	$\Delta T_{01}$ , К	$\tau_{1,c}$	$\Delta T_{02}$ , К	$\tau_{2,c}$	$\Delta T_{01}/\tau_1$ , К/с	$\Delta T_{02}/\tau_2$ , К/с	$\Delta T_0$ , К
0.00	309,37	280,71	283,21	280,68	1,10	1,01	315,40
0,01	308,13	280,70	282,08	280,68	1,09	1,01	315,23
0,05	307,21	280,71	281,22	280,68	1,09	1,00	315,10
0,1	307,06	280,71	281,08	280,68	1,09	1,00	315,08
0,5	305,18	280,71	279,37	280,68	1,08	0,99	314,83

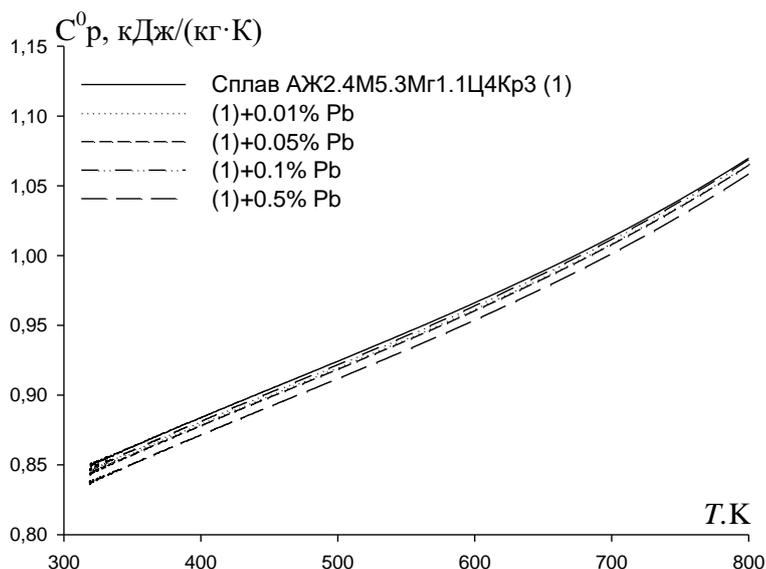
Тағйирёбии суръати хунукшавии намунаҳои хӯлаи мазкур дар расми 2.15 дарҷ гардидааст. Чӣ тавре ки аз расм дида мешавад, суръати хунукшавии хӯлаҳои бо сурб ҷавҳаронидашуда аз хӯлаи аслии АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 фарқ мекунад.



**Расми 2.15** – Вобастагии ҳарорат аз суръати хунукшавии хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо сурб ҷавҳаронидашуда

Қиматҳои суръати хунукшавӣ ва қоидаҳои иловагии Найман-Коппро истифода намуда, бо муодилаи (2.8) гармиғунҷоишӣ ҳосӣ хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо сурб ҷавҳаронидашуда ҳисоб карда шуд.

Натиҷаҳои бадастовардашудаи  $C_p^0$  хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо сурб ҷавҳаронидашуда пас аз ҳар 100К дар ҷадвали 2.8 ва расми 2.16 оварда шудааст.



**Рисунок 2.16** – Гармиғунҷоишӣ ҳосӣ хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо сурб ҷавҳаронидашуда, вобаста аз ҳарорат

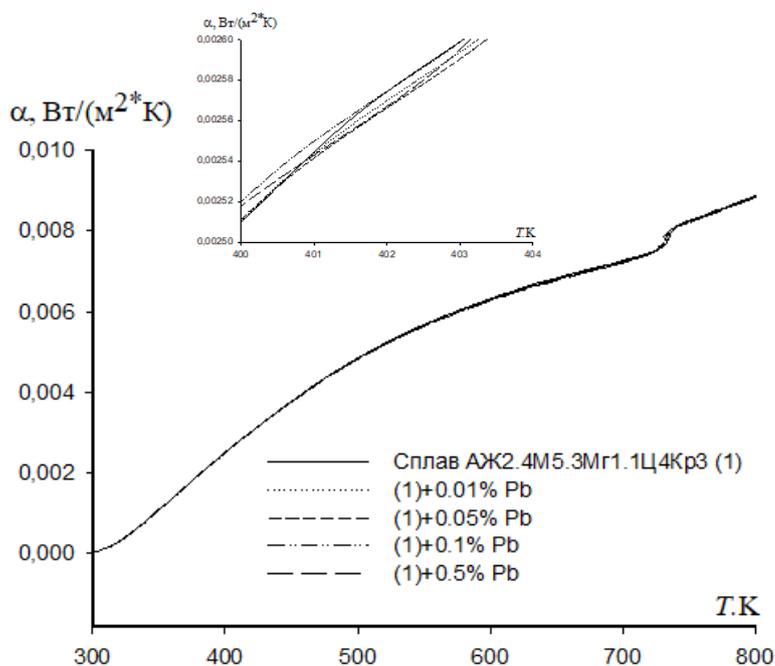
**Ҷадвали 2.8** – Гармиғунҷоишӣ ҳосӣ (Дж/(кг·К)) хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо сурб ҷавҳаронидашуда, вобаста аз ҳарорат:

Миқдори сурб дар таркиби хӯла, % - масса	Т, К					
	300	400	500	600	700	800
0.00	0,8369	0,8795	0,9198	0,9616	1,0088	1,0652
0.01	0,8352	0,8778	0,9182	0,9601	1,0075	1,0642
0.05	0,8384	0,8813	0,9219	0,9640	1,0116	1,0687
0.1	0,8290	0,8717	0,9121	0,9541	1,0018	1,0590
0.5	0,8369	0,8795	0,9198	0,9616	1,0088	1,0652
$C_p^0$ , %	-1,47	-1,40	-1,33	-1,26	-1,16	-1,02

Баъдан, дар асоси маълумоти ҳисобшудаи гармигунҷоиш ва ба таври таҷрибавӣ ба даст овардани бузургии суръати хунуккунии намунаҳои хӯла, вобастагии ҳарорат аз коэффитсиенти гармигузаронӣ ( $\alpha$ , Вт/К·м<sup>2</sup>) бо истифода аз муодилаи (2.12) ҳисоб карда шуд. Натиҷаҳои ҳисоб дар ҷадвали 2.9 ва расми 2.17 оварда шудаанд.

**Ҷадвали 2.9** – Вобастагии коэффитсиенти гармигузаронии (Вт/К·м<sup>2</sup>) хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо сурб ҷавҳаронидашуда аз ҳарорат:

Микдори сурб дар таркиби хӯла %- масса	Т, К					
	300	400	500	600	700	800
0.00	-0,0004855	0,002644	0,0048375	0,006416	0,0077005	0,009012
0.01	-0,0005939	0,0024752	0,0045875	0,0060688	0,0072449	0,0084416
0.05	-0,0005185	0,002548	0,0046625	0,006152	0,0073435	0,008564
0.1	-0,0005231	0,0025808	0,0047375	0,0062752	0,0075221	0,0088064
0.5	-0,000475	0,00262	0,004775	0,00632	0,007585	0,0089



**Расми 2.17** - Вобастагии коэффитсиенти гармигузаронии хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо суб ҷавҳаронидашуда аз ҳарорат

Бо истифода аз барномаи Sigma Plot ва муодилаи 2.8 барои муодилаи 2.18 коэффитсиентҳои зерин ба даст оварда шудаанд, ки гармигунҷоиши хоси хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо сурб чавҳаронидашуда вобаста аз ҳарорат, ҳисоб карда шуд. Қимати коэффитсиентҳо барои муодилаи 2.14 дар ҷадвали 2.10 нишон дода шудааст.

Барои ҳисоб намудани тағйирёбии энталпия, энтропия ва энергияи Гипс вобаста аз ҳарорат бо муодилаҳои 2.16, 2.17 ва 2.18 интегралҳо аз гармигунҷоиши хос ва муодилаи 2.15 истифода шуд, ки қимати коэффитсиентҳои онҳо дар ҷадвали 2.10 нишон дода шудааст.

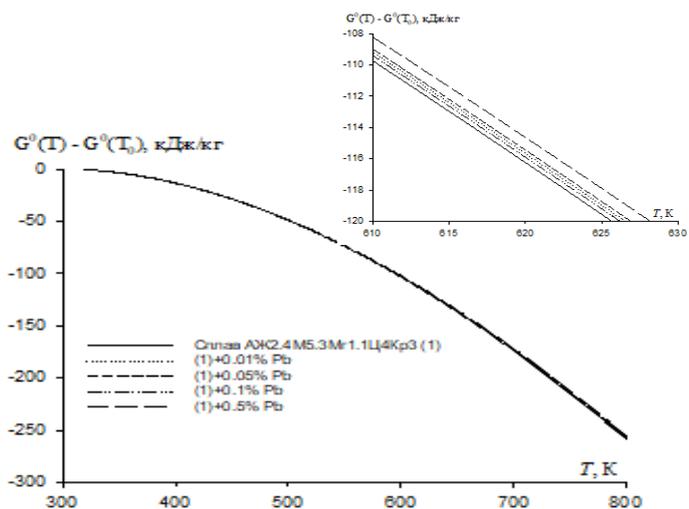
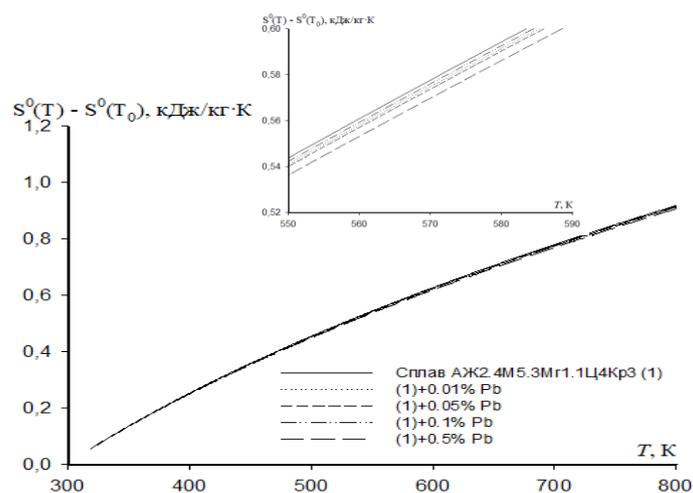
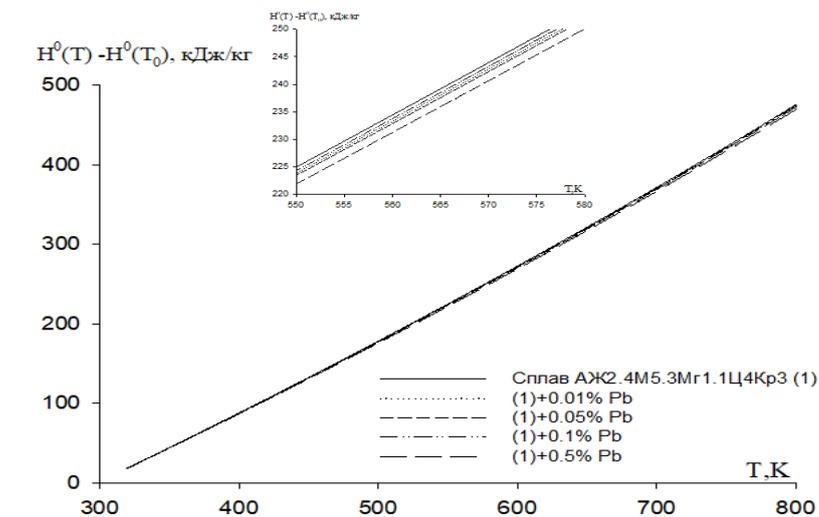
Натиҷаҳои ҳисобшудаи тағйирёбии энталпия, энтропия ва энергияи Гиббс вобаста аз ҳарорат барои хӯлаҳои алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо сурб чавҳаронидашуда ва эталон (Cu тамғаи М00) дар фосилаи ҳар як 100К дар ҷадвали 2.11 ва расми 2.18 дарҷ гардидаанд.

**Ҷадвали 2.10** – Бузургии коэффитсиентҳои  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  дар муодилаи (2.15) барои хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо сурб чавҳаронидашуда:

Миқдори сурб дар таркиби хӯла, %-и масса	$A$	$b \cdot 10^{-4}$	$c \cdot 10^{-7}$	$d \cdot 10^{-9}$	Коэффитсиенти коррелятсии R
0.00	0.6605	8.10	-8.85	0.64	1,00
0.01	0.6563	8.11	-8.9	0.644	1,00
0.05	0.6543	8.13	-8.95	0.649	1,00
0.1	0.6566	8.17	-8.17	0.652	1,00
0.5	0.6477	8.16	$-9.03 \cdot 10^{-7}$	0.657	1,00

**Ҷадвали 2.11** – тағйирёбии функсияҳои термодинамикии хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо сурб чавхаронидашуда ва эталон (Cu тамғаи М00), вобаста аз ҳарорат:

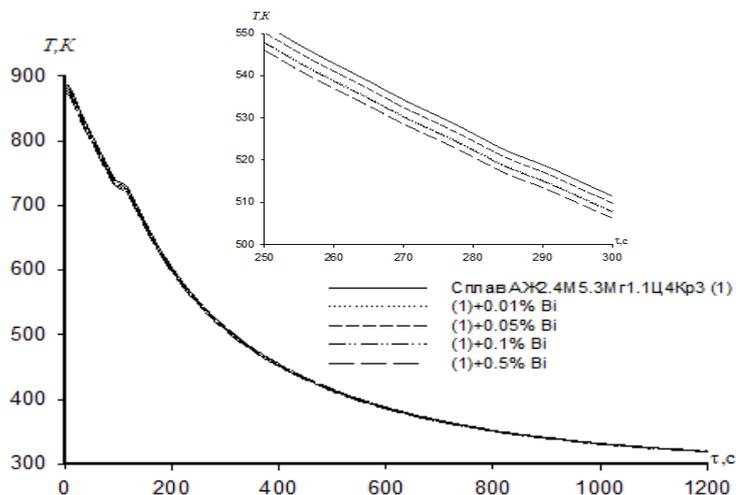
Т, К	Хӯлаи АЖ2.4М5.3 Мг1.1Ц4Кр3	+0.01% Pb	+0.05% Pb	+0.1% Pb	+0.5% Pb
	$[H^0(T) - H^0(T_0^*)], \text{кДж/кг}$				
300	1,55532	1,54747	1,54430	1,55025	1,53282
400	87,84032	87,40330	87,23034	87,57009	86,60019
500	178,24930	177,37250	177,03400	177,73010	175,79000
600	272,74030	271,41400	270,91770	271,99280	269,07020
700	371,65530	369,87280	369,23300	370,71160	366,80280
800	475,72030	473,48060	472,72100	474,63140	469,74420
$[S^0(T) - S^0(T_0^*)], \text{кДж/(кг} \cdot \text{К)}$ для сплавов					
300	0,00520	0,00517	0,00516	0,00518	0,00513
400	0,25313	0,25187	0,25137	0,25235	0,24956
500	0,45471	0,45247	0,45160	0,45337	0,44841
600	0,62687	0,62381	0,62265	0,62512	0,61836
700	0,77925	0,77549	0,77411	0,77720	0,76892
800	0,91813	0,91376	0,91221	0,91588	0,90630
$[G^0(T) - G^0(T_0^*)], \text{кДж/кг}$ для сплавов					
300	-0,0048	-0,00479	-0,00478	-0,00480	-0,00474
400	-13,41280	-13,34570	-13,31900	-13,37070	-13,22180
500	-49,10440	-48,86070	-48,76470	-48,95500	-48,41450
600	-103,38100	-102,87100	-102,67300	-103,07600	-101,94700
700	-173,82200	-172,97100	-172,64500	-173,32600	-171,44400
800	-258,78400	-257,52400	-257,05200	-258,07100	-255,29400



**Расми 2.18** – Тағйирёбии функсияҳои термодинамикии ҳулаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо сурб чавҳаронидашуда ва эталон (Cu тамғаи М00), вобаста аз ҳарорат

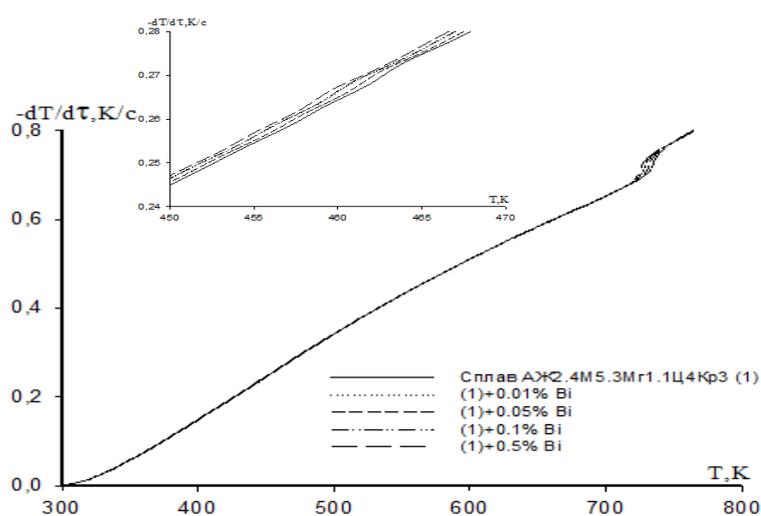
## 2.5. Гармигунҷош ва функсияҳои термодинамикии хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо висмут чавҳаронидашуда

Қаҷхаттаҳои хунуккунии намунаҳои хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо висмут чавҳаронидашуда вобаста аз вақт, ки бо таври таҷрибавӣ бадаст оварда шудаанд, дар ҷадвали 2.19 нишон дода шудааст.



**Расми 2.19** – Қаҷхаттаи хунукшавии хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 с висмутом и эталона марки (Cu маркаи М00).

Суръати хунукшавии намуна бо муодилаи 2.11 ҳисбо карда шудааст. Дар ҷадвали 2.12 барои хӯлаҳои қимати коэффитсентҳои  $\Delta T_{01}$ ,  $\tau_1$ ,  $\Delta T_{02}$ ,  $\tau_2$  -и муодилаи 2.11 нишон дода шудааст.



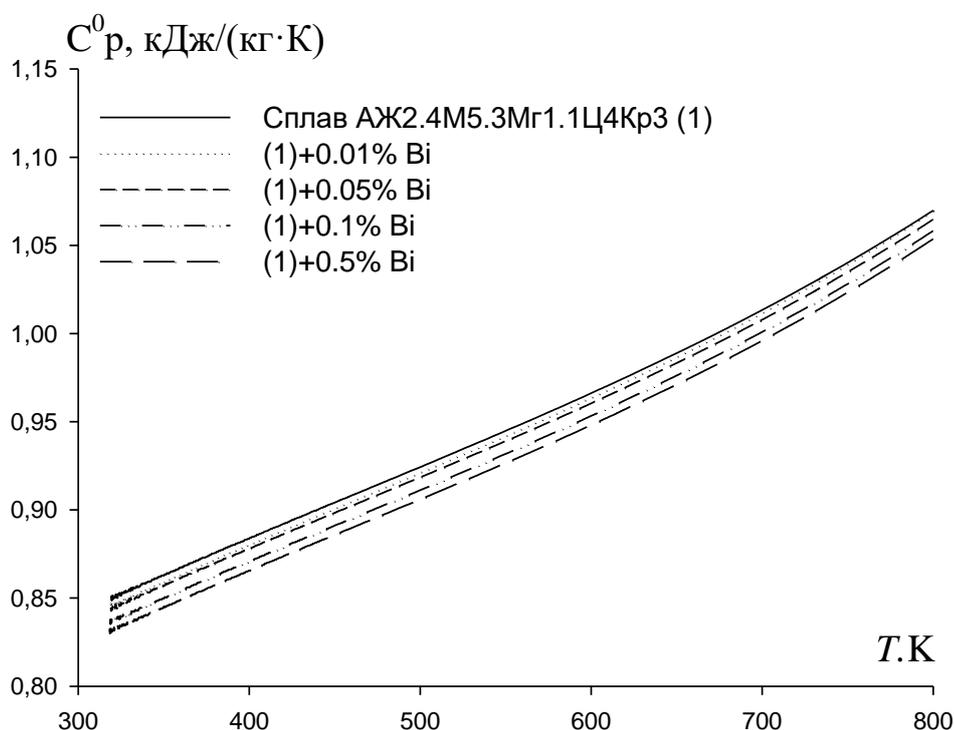
**Расми 2.20** – Суръати хунукшавии хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо висмут чавҳаронидашуда, вобаста аз ҳарорат

**Чадвали 2.12** – қимати коэффитсиентҳои  $\Delta T_{01}$ ,  $\tau_1$ ,  $\Delta T_{02}$ ,  $\tau_2$  – и муодилаи 2.11 барои хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо висмут чавҳаронидашуда:

Миқдори висмут дар таркиби хӯла, %-и масса	$\Delta T_{01}$ , К	$\tau_{1,c}$	$\Delta T_{02}$ , К	$\tau_{2,c}$	$\Delta T_{01}/\tau$ , К/с	$\Delta T_{02}/\tau$ , К/с	$\Delta T_0$ , К
0.00	309,37	280,71	283,21	280,68	1,10	1,01	315,40
0.01	308,127	280,70	282,08	280,68	1,10	1,01	315,23
0.05	307,21	280,71	281,22	280,68	1,09	1,00	315,10
0.1	307,06	280,71	281,08	280,68	1,09	1,00	315,08
0.5	305,18	280,71	279,37	280,68	1,0872	0,99	314,83

Бо истифода аз барномаи Sigma Plot натиҷаҳои тадқиқоти суръати хунуқшавии намунаҳои озмоишӣ аз хӯлаи алюминий ва эталонро коркард карда, гармиғунҷоиши хӯлаи мазкурро бо муодилаи 2.9 ҳисоб намудем.

Гармиғунҷоиши хоси хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо висмут чавҳаронидашуда дар расми 2.21 ва чадвали 2.13 оварда шудааст.



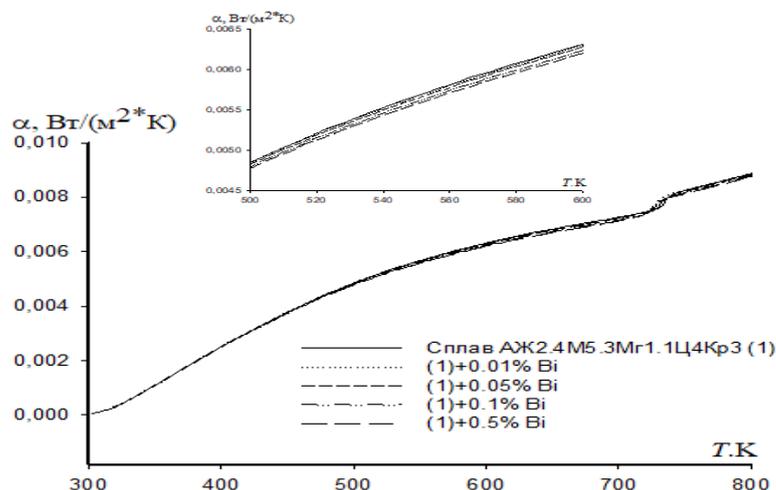
**Расми 2.21** – Гармиғунҷоиши хоси хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо висмут чавҳаронидашуда вобаста аз ҳарорат

**Ҷадвали 2.13** – Гармиғунҷоиши хоси хӯлаи алюминии АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо висмут чавҳаронидашуда (Дж/(кг К)):

Миқдори висмут дар таркиби хӯла % - масса	Т, К					
	300	400	500	600	700	800
0.00	0,8411	0,8839	0,9243	0,9661	1,0134	1,0698
0.01	0,8373	0,8805	0,9213	0,9637	1,0118	1,0696
0.05	0,8352	0,8778	0,9182	0,9601	1,0075	1,0642
0.1	0,8282	0,8709	0,9114	0,9534	1,0012	1,0584
0.5	0,8229	0,8656	0,9060	0,9481	0,9959	1,0535
зиёдшавии $C_p^0$ , %	-2,21	-2,11	-2,02	-1,90	-1,75	-1,54

Пас аз ин бузургии суръати хунукшавӣ ва гармиғунҷоиши хӯлароро, ки дар натиҷаи тадқиқот ба даст оварда шуда буд истифода намуда коэффитсиенти гармигузаронии хӯлаи мазкурро вобаста аз ҳарорат ҳисоб намудем.

Натиҷаҳои ҳисоби коэффитсиенти гармигузаронии хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо висмут чавҳаронидашуда дар ҷадвали 2.14 ва расми 2.22 нишон дода шудааст.



**Расми 2.22** – Коэффитсиенти гармигузаронии хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо висмут чавҳаронидашуда вобаста аз ҳарорат

Бо истифода аз барномаи Sigma Plot ва муодилаи 2.8 барои муодилаи 2.18 коэффисиентҳои зерин ба даст оварда шудаанд, ки гармиғунҷоиши хоси хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо висмут чавҳаронидашуда вобаста аз ҳарорат, ҳисоб карда шуд. Қимати коэффитсиентҳо барои муодилаи 2.18 дар ҷадвали 2.14 нишон дода шудааст.

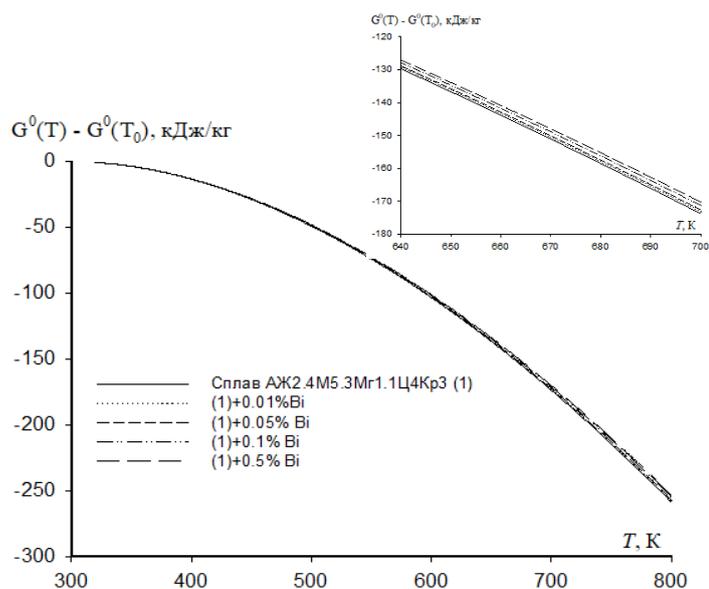
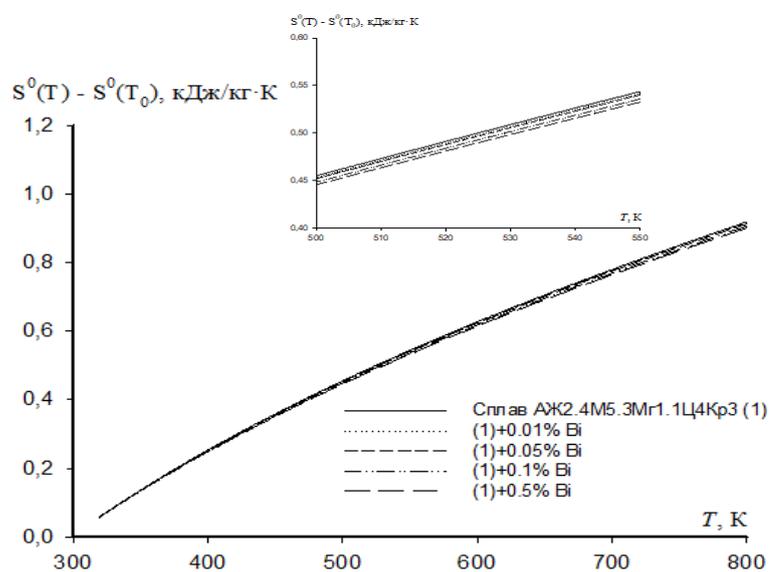
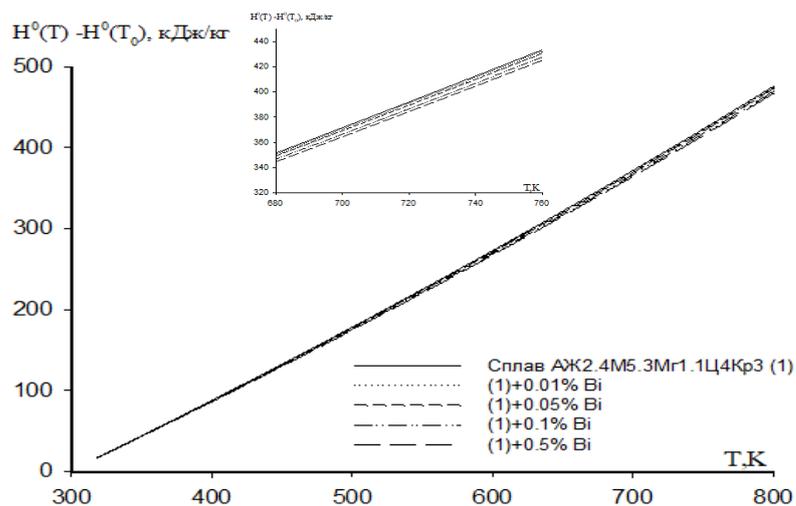
$$C^0_p = a + bT + cT^2 + dT^3 :$$

**Ҷадвали 2.14** – Қимати коэффитсиентҳои  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  – и муодилаи 2.18 барои эталон ва хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3, бо висмут чавҳаронидашуда:

Миқдори висмут дар таркиби хӯла %-и масса	$A$	$b \cdot 10^{-4}$	$c \cdot 10^{-7}$	$d \cdot 10^{-10}$	Коэффитсиенти коррелятсия R
0.00	0.6605	8.10	-8.85	6.40	1.00
0.01	0.654	8.26	-9.16	6.66	1.00
0.05	0.6543	8.13	-8.95	6.49	1.00
0.1	0.6466	8.18	-9.07	6.60	1.00
0.5	0.6411	8.21	-9.17	6.69	1.00

Ҳангоми ҳисоб намудани тағйирёбии энталпия, энтропия ва энергияи Гипс вобаста аз ҳарорат бо муодилаҳои (2.15)-(2.17), интегралҳо аз гармиғунҷоиши хос бо муодилаи (2.18) истифода карда шуданд.

Натиҷаҳои ҳисоби тағйирёбии энталпия, энтропия ва энергияи Гипс вобаста аз ҳарорат, барои хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо висмут чавҳаронидашуда, нисбат ба эталони миссин (Cu тамғаи М00) баъди ҳар як 100К дар ҷадвали 2.15 ва дар расми 2.23 оварда шудааст.



Расми 2.23 – Тағйирёбии энталпия (а), энтропия (б) ва энергияи Гипс (в) барои хўлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо висмут чавҳаронидашуда.

**Ҷадвали 2.15** – Тағйирёбии функсияҳои термодинамикӣ вобаста аз ҳарорат барои хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо висмут чавҳаронидашуда:

Т, К	Сплав АЖ2.4М5.3М г1.1Ц4Кр3	+0.01% Вi	+0.05% Вi	+0.1% Вi	+0.5% Вi
	$[H^0(T) - H^0(T_0^*)]$ , кДж/кг барои хӯлаҳо				
300	1,555317	1,548301	1,544297	1,531377	1,521653
400	87,84032	87,47472	87,23034	86,52254	85,98386
500	178,2493	177,5632	177,034	175,6387	174,5647
600	272,7403	271,7801	270,9177	268,8479	267,2365
700	371,6553	370,491	369,233	366,514	364,373
800	475,7203	474,4614	472,721	469,3972	466,7492
$[S^0(T) - S^0(T_0^*)]$ , кДж/(кг · К) барои хулаҳо					
300	0,0052	0,005177	0,005164	0,00512	0,005088
400	0,253133	0,252075	0,251373	0,249331	0,247777
500	0,454707	0,452933	0,451597	0,44802	0,445272
600	0,626869	0,624593	0,622652	0,617844	0,614117
700	0,779254	0,776662	0,774112	0,768303	0,763759
800	0,91813	0,915409	0,912217	0,9056	0,900378
$[G^0(T) - G^0(T_0^*)]$ , кДж/кг барои хулаҳо					
300	-0.0042	-0,00479	-0,00478	-0,00474	-0,00471
400	-6.278	-13,3553	-13,319	-13,2097	-13,1269
500	-22.72	-48,9032	-48,7647	-48,3714	-48,0714
600	-47.56	-102,976	-102,673	-101,859	-101,233
700	-79.58	-173,172	-172,645	-171,298	-170,258
800	-117.95	-257,866	-257,052	-255,082	-253,553

## **2.6. Таъсири қалъагӣ, сурб ва висмут ба сохти таркибии хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3**

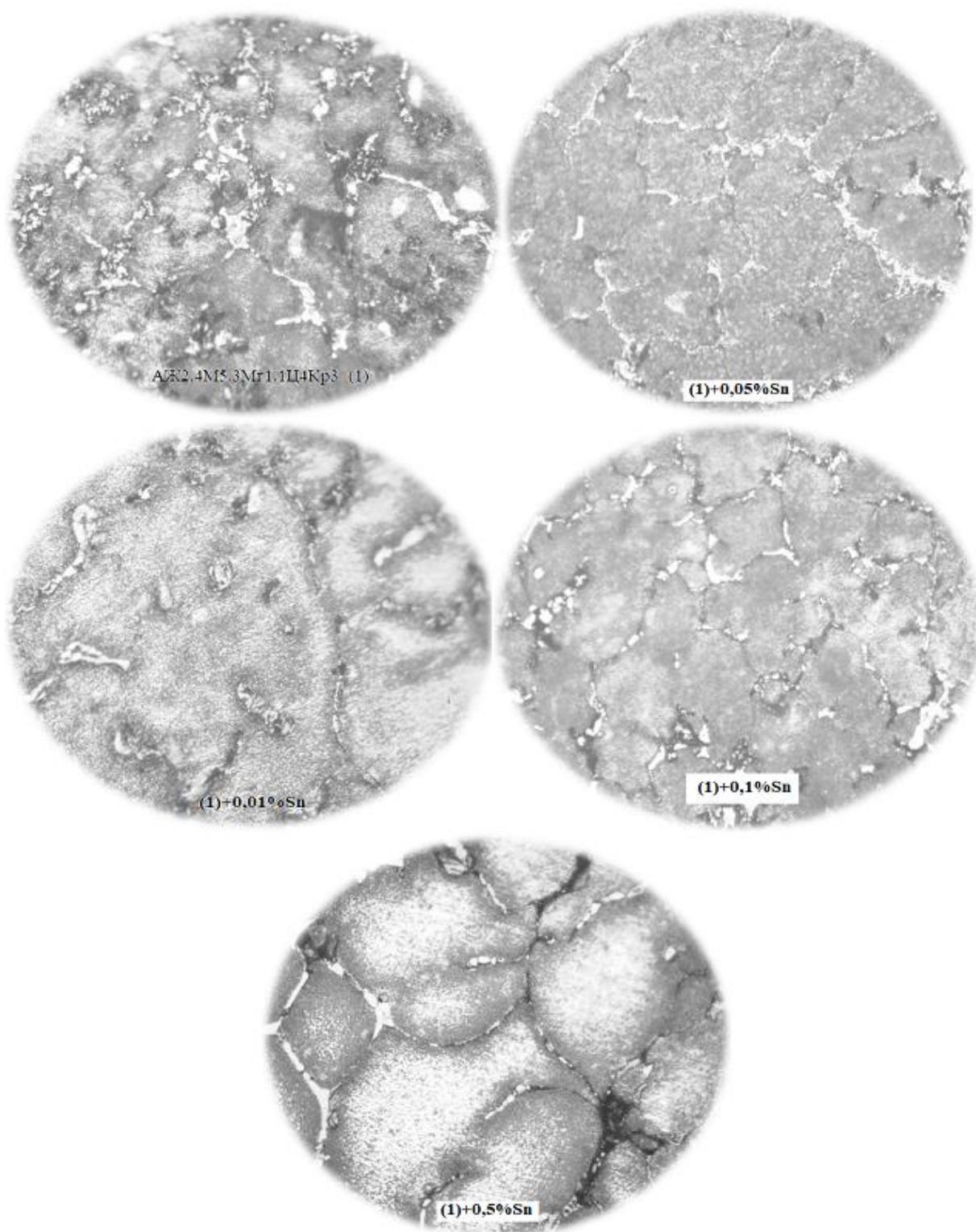
Омӯхтани сохти таркибӣ яке аз воситаҳои асосии тадқиқоти алюминий ва хӯлаҳои он ба шумор меравад. Ин имконият медиҳад ки таъсири гуногуни деформатсия ва коркард бо ҳарорат ба хосиятҳои маҳсулоти тайёри алюминий, инчунин таҳлил кардани сабабҳои корношам шудани маҳсулотро муайян кунем.

Тадқиқот имконият медиҳад, ки тағйирёбии сохти таркибиро вобаста аз таркиб ва ҳарорат мушоҳида намоем. Дарозии сарҳади гомогенӣ ва гетерогенӣ, инчунин мавҷудияти фазаҳои интерметалӣ дар системаро дақиқ муайян кардан мумкин аст. Сохти таркибии хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо қалъагӣ, сурб ва висмут ҷавҳаронидашуда дар микроскопи нурии тамғаи БИОМЕД-1 (Украина) тадқиқ карда шуд.

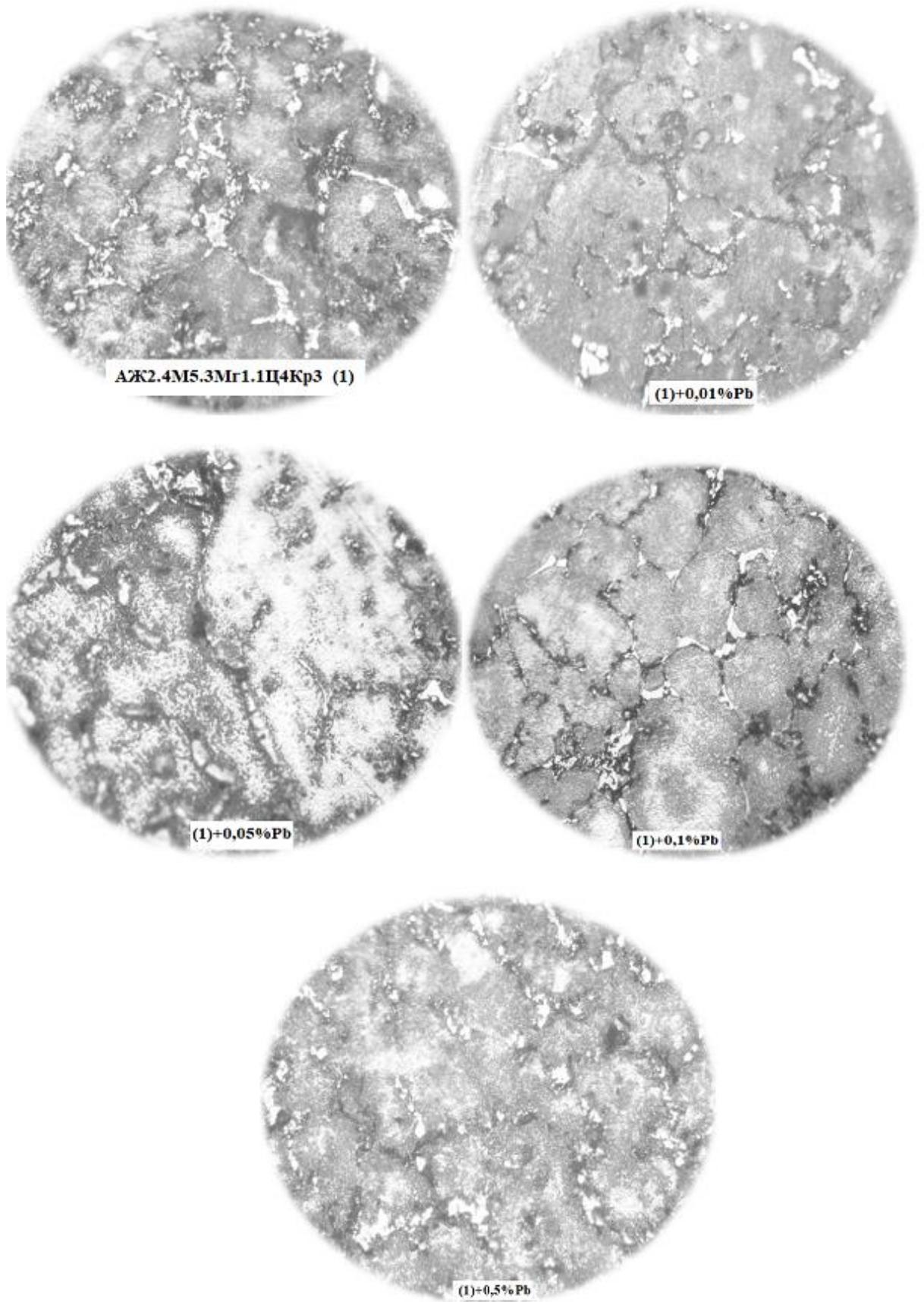
Барои омӯхтани сохти таркибии намунаҳои озмоишӣ аз хӯлаҳои моеи бадастовардашуда бо усули рехтагари намунаҳои цилиндршакли кутрашон 15мм ва дарозияшон 20мм ҳосил карда шуд. Ҳар як намунаро қаблан суфта карда, ба воситаи спирт аз равшан тоза намуда дар маҳлули 0,5%-и HF ғарқ карда шудаанд. Вақти захролудкунии сатҳи болоии намуна (шлиф) аз 30 то 50 сонияро ташкил дод.

Баъди захролудкардан микрошлифро дар оби ҷорӣ шуста, бо коғази тозаи махсус хушк карда шуд.

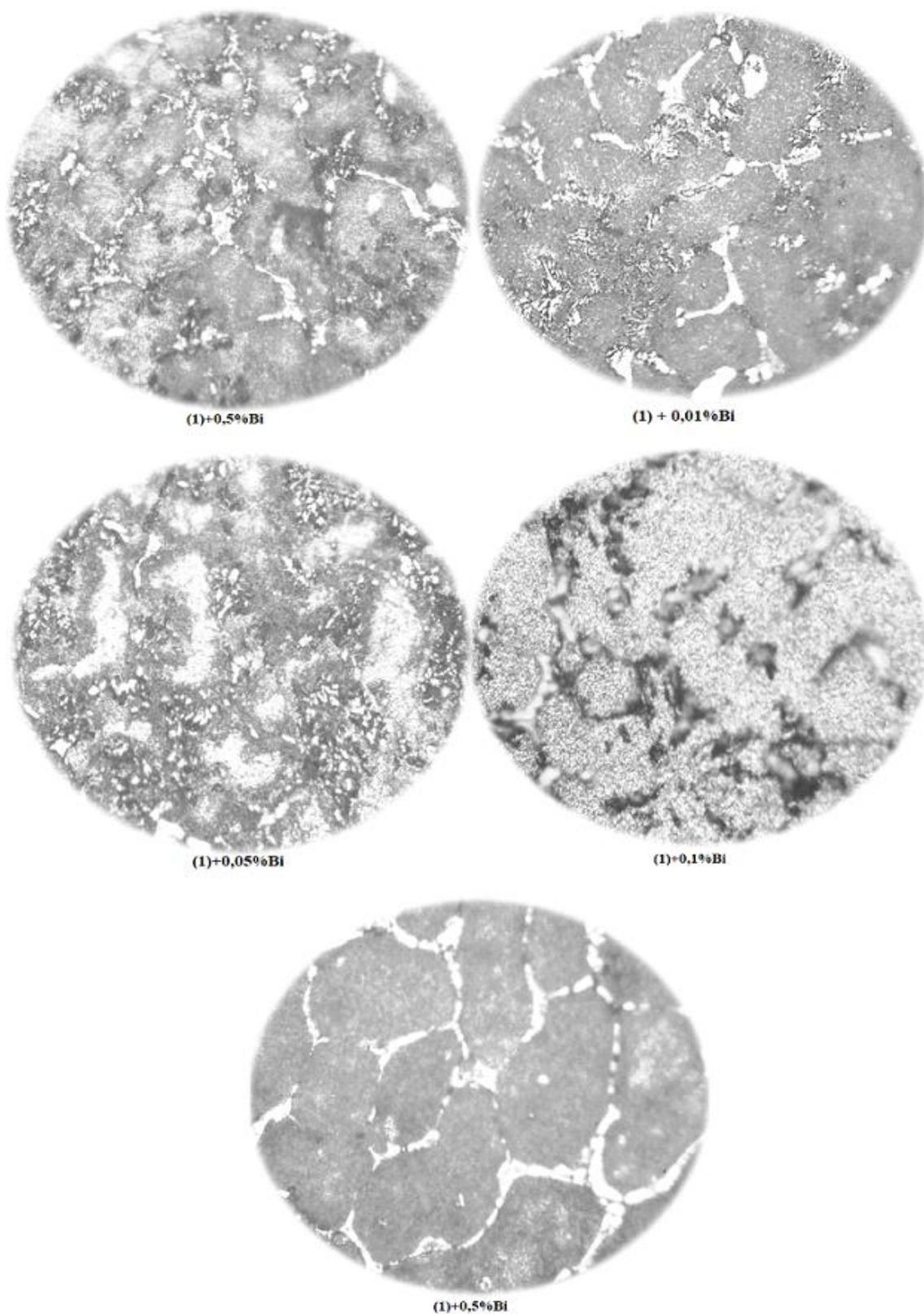
Сохти таркибии хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо қалъагӣ, сурб ва висмут ҷавҳаронидашуда маҳлули сахти алюминий бо эвтектика ҳосил намуда, миқдор ва андозаи онҳо аз миқдори элементи лигарӣ дар таркиби хӯла, вобаста аст. Хӯлаҳое ки дар таркибашон миқдори нисбатан ками қалъагӣ, сурб ва висмут доранд, андозаи дончаҳояшон калон мебошад. Бо зиёдшавии миқдори элементи лигарӣ сохти таркибии дончаҳои хурдандоза дошта ҳосил мешавад (расми 2.24-2.26).



**Расми 2.24** – Сошти таркибии (x500) хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 (1), бо қалъагӣ чавҳаронидашуда.



**Расми 2.25** – Сошти таркибии (x500) хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 (1), бо сурб чавҳаронидашуда.



**Расми 2.26** – Сохти таркибии (x500) хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 (1), бо висмут ҷавхаронидашуда.

Ҳангоми гузаронидани тадқиқот муайян карда шуд, ки сохти таркибии хӯлаҳои мавриди омӯзиш якхела буда, асосан аз маҳлули саҳти алюминий иборатанд. Инчунин зарачаҳои фазаи интерметаллидӣ мушоҳида карда шуд, ки дар натиҷаи кристалбандии хӯла ба вуҷуд омадаанд (расми 2.24-2.26). Миқдор ва андозаи доначаҳои фазаи дуум ба хосиятҳои механикии хӯлаи ибтидоӣ таъсир мерасонад. Саҳтӣ ва мустаҳкамии хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо зиёдшавии миқдори элементҳои лигарӣ, зиёд мешавад (Ҷадвали 2.16).

Саҳтӣ хосиятест, ки ҳангоми интиҳоби мавод барои истеҳсоли қисмҳои дорои вазифаҳои гуногун яке аз муҳимтаринҳо ҳисобида мешавад. Қимати саҳтӣ муайян мекунад, ки оё маводди омӯхташуда ҳамчун маводди конструксионӣ барои истеҳсоли қисмҳои, ки ҳангоми кор сарбории баланд доранд мувофиқ аст, ё не. Бо ин мақсад, мо як қатор тадқиқотро барои муайян кардани саҳтии намунаҳо аз ҳама хӯлаҳои синтезшуда гузаронидем. Барои муайян кардани саҳтӣ усули асосии Бринелл, ки васеъ истифода мешавад, интиҳоб карда шуд; аз тамоми хӯлаҳои синтезшуда, ки шаклашон мувофиқи стандарт (10 x 16 мм) доштанд, намунаҳо гирифта шуданд, ки баъдан дар дастгоҳи Бринел тамғаи ТШ-2 санҷида шуданд.

Бартарии дигари усули Бринелл дар он аст, ки бо дониستاني қиматҳои саҳтӣ бо истифода аз ҳисобҳои хосияти дигари хӯлаҳоро муайян кардан мумкин аст, масалан устуворӣ. Бо истифода аз қиматҳои зарурӣ, метавон ҳудуди устувории маводро бо формулаи зерин ҳисоб кард:

$$\sigma_b = k \cdot HB, \text{ МПа}$$

Тибқи маълумоти адабиёт, «k» барои хӯлаҳои алюминӣ ба 0,25 баробар аст. Дар асоси натиҷаҳои ин озмоишҳои маълум гардид, ки иловаҳои мо ба андозаи 0,5 % масса ба саҳти ва устуворӣ таъсири манфӣ мерасонад.

**Чадвали 2.16** – Натиҷаҳои сахтӣ ва ҳудуди устуворӣ:

Иловаҳо ва миқдори онҳо, (% масса)	Сахти* НВ,		Мустаҳками (ҳисоби), МПа
	кгс/мм <sup>2</sup>	МПа	
0,0	94,02	922,3362	230,5841
0,01Sn	89,09	873,9729	218,4932
0,05Sn	84,54	829,3374	207,3344
0,1Sn	80,33	788,0373	197,0093
0,5Sn	72,78	713,9718	178,493
0,01Pb	94,02	922,3362	230,5841
0,05Pb	87,23	855,7263	213,9316
0,1Pb	84,54	829,3374	207,3344
0,5Pb	81,97	804,1257	201,0314
0,01Bi	89,09	873,9729	218,4932
0,05Bi	83,67	820,8027	205,2007
0,1Bi	80,33	788,0373	197,0093
0,5Bi	76,42	749,68	187,42

\* - қимати миёнаро аз рӯйи натиҷаҳои 3 маротиба ченкуни муайян намудем.

## 2.7. Хулосаи боби 2

Натиҷаҳои тадқиқоти хосиятҳои физикаи гармо ва функцияҳои термодинамикии хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо қалъагӣ, сурб ва висмут чавҳаронидашуда дар мисоли хӯлаи бо миқдори 0,5%-и масса чавҳаронидашуда дар чадвалҳои 2.17 ва 2.18 нишон дода шудааст. Чӣ тавре, ки аз чадвал маълум аст, бо зиёдшавии ҳарорат гармиғунҷоиш, энталпия ва энтропия хӯла зиёдшуда энергияи Гиббс кам мешавад. Иловаи қалъагӣ, сурб ва висмут бузургии гармиғунҷоиш, энталпия ва энтропияи хӯларо начандон кам мекунад (чадвали 2.17 и 2.18), ки бо маълумотҳои адабиёт мувофиқ аст. Ҳангоми гузариш аз хӯлаи бо сурб чавҳаронидашуда ба хӯлаи бо висмут чавҳаронидашуда пастшавии гармиғунҷоиш мушоҳида мешавад.

Ҳамин тариқ, гармиғунҷоиши хос ва коэффитсиенти гармигузаронӣ хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3, бо Pb, Sn ва Bi чавҳаронидашуда омӯхта шудаанд.

**Чадвали 2.17** –Гармиғунчоиши хоси хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3, бо Pb, Sn ва Bi чавҳаронидашуда, вобаста аз ҳарорат:

X, K	Гармиғунчоиш, кДж/к.				Элементи лигарй [5]		
	АЖ2.4М5.3- Мг1.1Ц4Кр3	+0,5 Pb	+ 0,5 Sn	+ 0.5 Bi	Pb	Sn	Bi
300	0,8411	0,8261	0,8290	0,8229	228,7	127,5	122,3
400	0,8839	0,8686	0,8717	0,8656	243,5	132,8	127,2
500	0,9243	0,9089	0,9121	0,9060	261,5	137,6	137,2
600	0,9661	0,9508	0,9541	0,9481	241,5	142,1	141,0
700	1,0134	0,9983	1,0018	0,9959	-	-	-
800	1,0698	1,0554	1,0590	1,0535	236,3	143,3	134,6

**Чадвали 2.18** – Вобастагии энталпия, энтропия ва энергияи Гиббси хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3, бо Pb, Sn ва Bi чавҳаронидашуда, аз ҳарорат:

X, K	Энталпия, кҶ/моль			
	АЖ2.4М5.3 Мг1.1Ц4Кр3	+0,5 Pb	+ 0,5 Sn	+ 0,5 Bi
300	1,55532	1,52743	1,53282	1,52165
400	87,84032	86,29655	86,60019	85,98386
500	178,24930	175,17380	175,79000	174,56470
600	272,74030	268,12660	269,07020	267,23650
700	371,65530	365,51740	366,80280	364,37300
800	475,72030	468,10460	469,74420	466,74920
Энтропия, кҶ/(моль ·к)				
300	0,00520	0,00511	0,00513	0,00509
400	0,25313	0,24868	0,24956	0,24778
500	0,45471	0,44684	0,44841	0,44527
600	0,62687	0,61619	0,61836	0,61412
700	0,77925	0,76623	0,76892	0,76376
800	0,91813	0,90313	0,90630	0,90038
Энергия Гиббса, кҶ/мол				
300	-0,00481	-0,00473	-0,00474	-0,00471
400	-13,41280	-13,17540	-13,22180	-13,12690
500	-49,10440	-48,24470	-48,41450	-48,07140
600	-103,38100	-101,59000	-101,94700	-101,23300
700	-173,82200	-170,84300	-171,44400	-170,25800
800	-258,78400	-254,40000	-255,29400	-253,55300

## **БОБИ Ш. КИНЕТИКАИ ОКСИДШАВИИ ХҶЛАИ АЛЮМИНИИ АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3, БО ҚАЛЪАГӢ, СУРБ ВА ВИСМУТ ЧАВҲАРОНИДАШУДА**

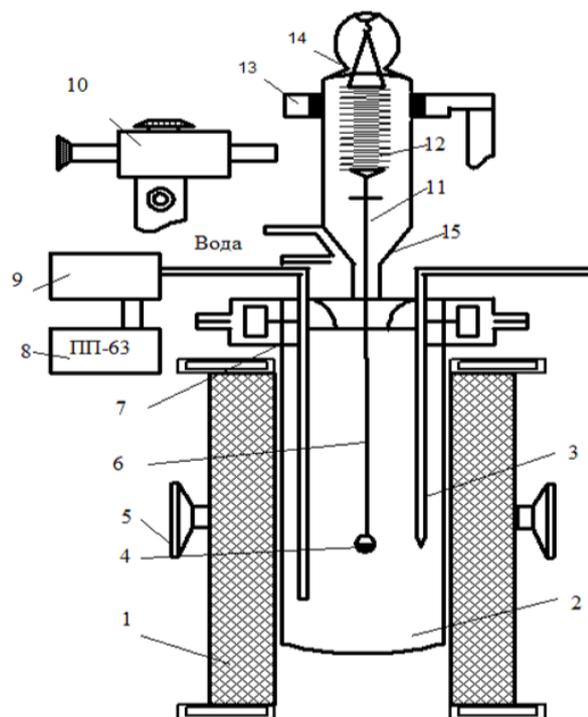
### **3.1. Дастгоҳ ва методикаи омӯзиши кинетикаи оксидшавии хӯлаҳо**

Дар ин боб усулҳои омӯзиши кинетикаи оксидшавии хӯлаҳо, маҳсули оксидшавии онҳо ва кинетикаи оксидшавии хӯлаҳои алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо қалъагӣ, сурб ва висмут чавҳаронидашда баррасӣ гардидааст. Аҳамияти робитаи хӯлаҳои металлӣ бо муҳити гуногуни сахттаъсир дар ҳарорати баланд хеле зиёд аст, зеро аксари металҳо ва хӯлаҳо, ки дар соҳаи техника истифода мешаванд, дар натиҷаи зангзанӣ дар ҳарорати баланд ё оксидшавӣ қобилияти кории худро аз даст медиҳанд [115].

Хӯла барои тадқиқот дар оташдони намуди СШОЛ бо гудохтани компонентҳо ба даст оварда шудааст. Вазнченкунии шихтаҳо дар тарозуҳои аналитикии АРВ-200 бо саҳеҳияти  $0.1 \cdot 10^{-4}$  кг амалӣ карда шуд. Обьекти тадқиқотӣ - хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо қалъагӣ, сурб ва висмут чавҳаронидашуда ба ҳисоб мераванд. Равандҳои кинетикии оксидшавӣ бо усули термогравиметрӣ гузаронида шуд, ки дастгоҳи истифодашуда дар расми 3.1 нишон дода шудааст [116, 117].

Тағйирёбии вазн бо дарозшавии фанар ва бо ёрии катетометр КМ8 назорат карда мешавад. Дар раванди таҷриба тигелҳои истифода шуданд, ки аз оксиди алюминий сохта шуда, қутрашон 18-20мм ва баландиашон ба 25-26 мм баробар аст. Тигелҳо пеш аз иҷрои кор дар ҳарорати 1273-1473К дар муҳити оксидкунанда дар муддати 1,5 соат то вазни доими соҳиб шуданашон, тафсонида мешаванд. Пас аз он тигелҳо бо хӯлаҳои тадқиқшаванда дар минтақаи изотермикии оташдон ҷой дода шуда, гармкунии хӯла дар муҳити оксидкунанда давом дода шуд. Баъд аз итмоми озмоиш дар ҳарорати доимӣ система хунук ва тигел бо муҳтавиёти намуна баркашида, сипас сатҳи реаксионӣ муайян карда шуд. Ниҳоятан, парда (плёнкаи)-и оксидии пайдошударо бо эҳтиёт аз сатҳи намуна тарошида, бо усули спектроскопияи

инфрасурх ва таҳлили рентгенофазавӣ тадқиқ намудем. Тадқиқот дар муҳити ҳаво дар ҳарорати 723, 773К ва 823К гузаронида шуд.



**Расми 3.1** – Нақшаи дастгоҳ барои омӯзиши кинетикаи оксидшавӣ: 1-оташдони Тамман; 2-рӯйпӯш аз оксиди алюминий; 3-қубури газгузар; 4-тигел; 5-ҳароратсанҷ; 6-сими платинӣ; 7-сарпӯши бо об хунук-шаванда; 8-потенциометр; 9-об; 10-катетометр; 11-баллон; 12-фанар аз сими молибденӣ; 13-тақягоҳ; 14-сарпӯш.

### **3.2. Кинетикаи оксидшавии хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо қалъагӣ**

Бо мақсади тадқиқи таъсири қалъагӣ ба кинетикаи оксидшавии хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3, як қатор хӯлаҳо бо миқдори гуногуни қалъагӣ (аз 0,01% то 0,5% -и масса) дар ҳолати сахт синтез карда шуданд.

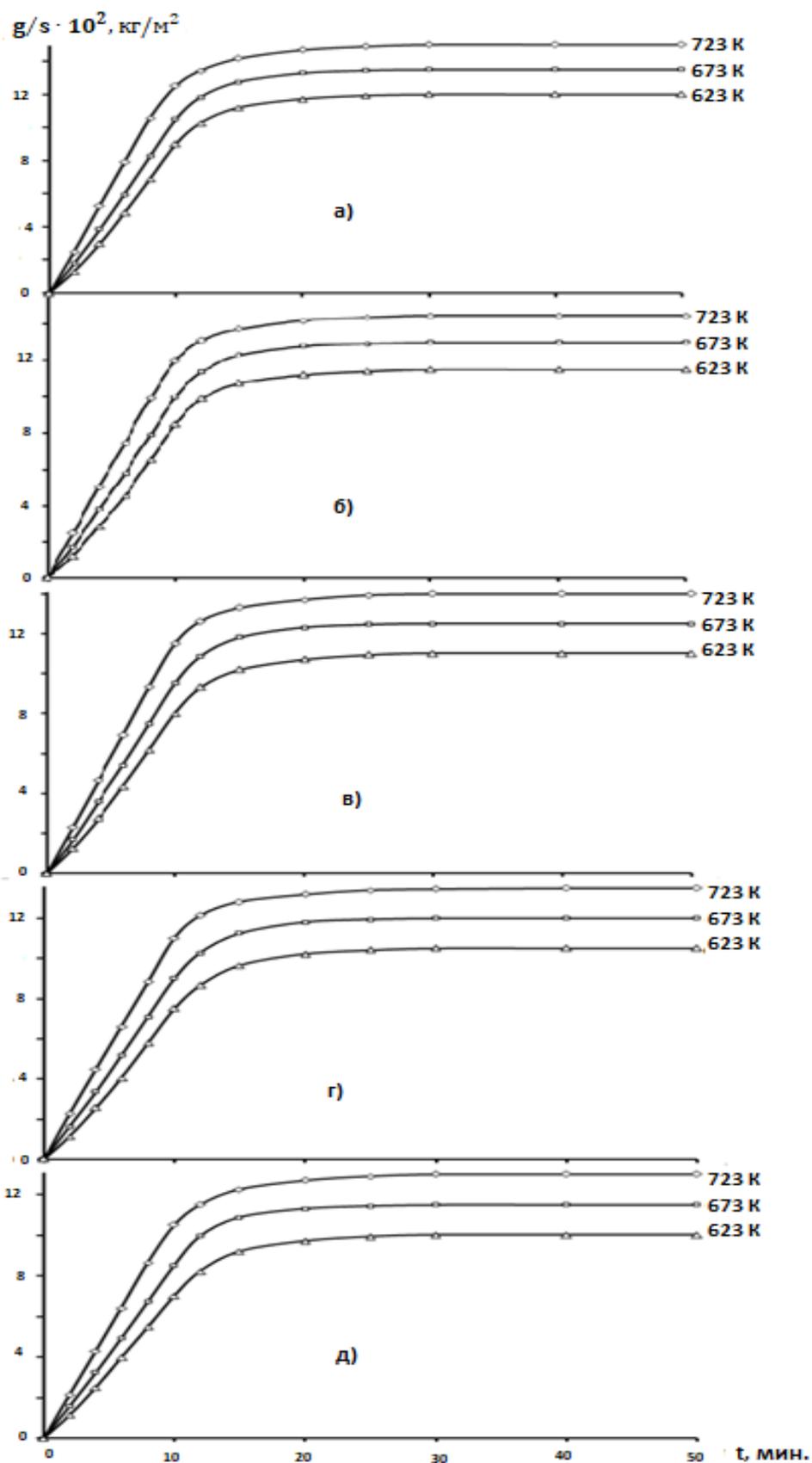
Тадқиқот дар атмосфераи ҳаво дар ҳарорати 623К, 673К ва 723К гузаронида шуд. Натиҷаҳои тадқиқот дар расмҳои 3.2-3.5 ва ҷадвалҳои 3.1, 3.2 нишон додашудаанд.

Қаҷхатҳои кинетикии оксидшавии хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3, дар ҳолати сахти (расми 3.2) раванди васеътари

ҳосилшавии пардаи оксидро дар марҳилаи ибтидоии оксидшавӣ васеъ тавсиф мекунад. Суръати оксидшавӣ вобаста ба вақт ва ҳарорат тадричан афзоиш меёбад. Бо вучуди ин, вазни хоси намуна пас аз 15 дақиқа ба арзиши доимӣ мерасад ва суръати оксидшавӣ дар ҳарорати 723К ба  $14,5 \text{ кг/м}^2$  баробар мегардад. Суръати миёнаи оксидшавӣ, ки аз рӯйи қачхатҳо дар нуқтаҳои расанда ва бо формулаи  $K=g/s \cdot \Delta t$  ҳисоб карда шудааст, дар ҳарорати 623К ва 723К мутаносибан ба  $3,01 \cdot 10^{-4}$  ва  $4,02 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{соня}^{-1}$  баробар аст. Энергияи фаъоли оксидшавӣ, ки бо истифода аз тангенс кунҷи моили хатти вобастагии  $-\lg K - 1/T$  ҳисоб шудааст, 82,1 кҶ/мол-ро ташкил медиҳад (Ҷадвали 3.1).

Қачхатҳои квадратии кинетикии оксидшавӣ ва алгоритмиҳои онҳо барои хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3, ки дар таркибашон аз 0,1 то 0,5 % - масса қалъагӣ доранд, дар координатҳои  $(g/s)^2-t$  дар расми 3.2 ва ҷадвали 3.2 оварда шудаанд.

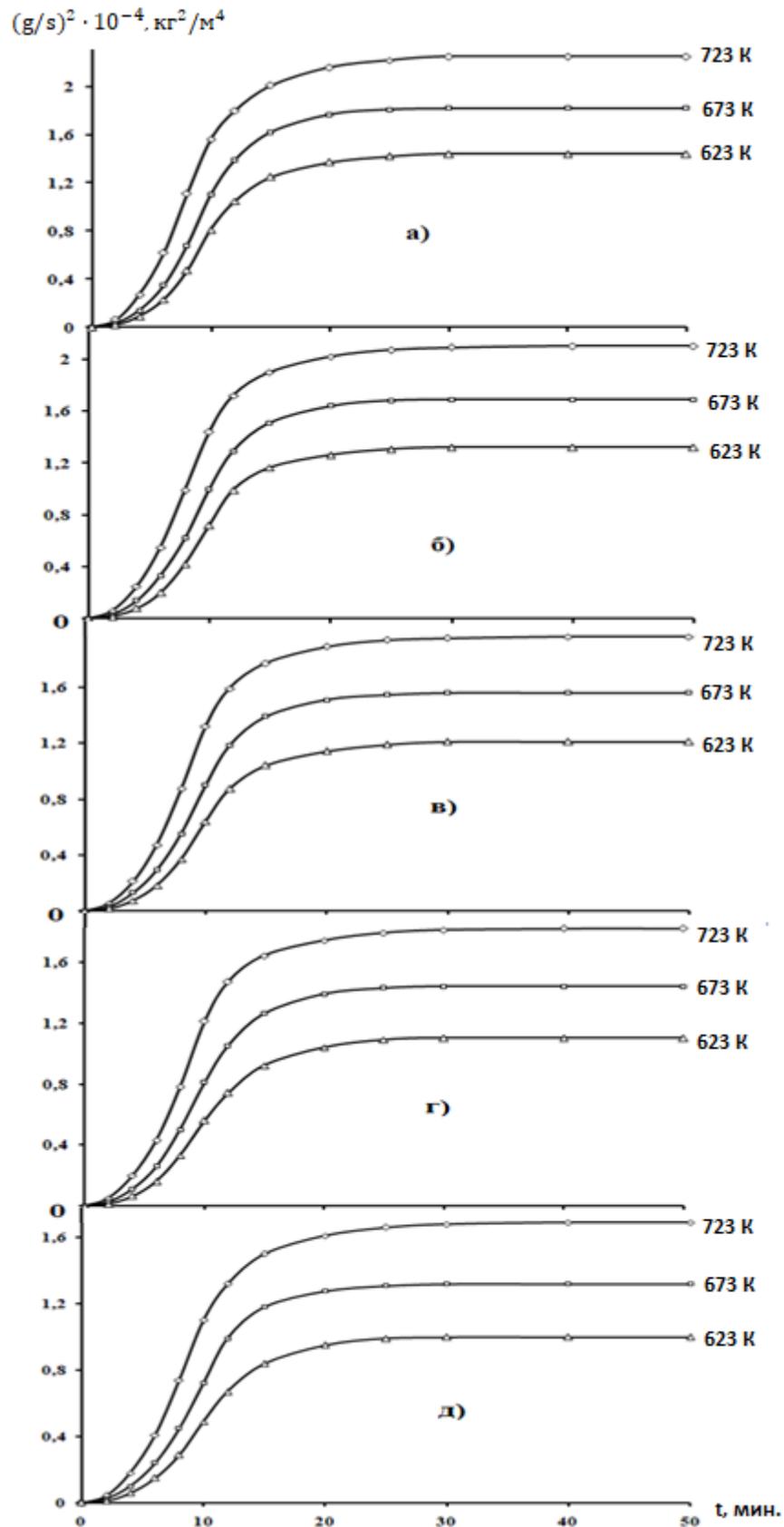
Қачхатҳои квадратии кинетикии оксидшавии хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо 0,1 % - массаи қалъагӣ ҷавҳаронидашуда, дар расми 3.2 г нишон дода шудаанд. Кинетикаи оксидшавии хӯлаҳои мазкур дар ҳарорати 623, 673К ва 723К гузаронида шудааст. Қимати суръати миёнаи оксидшавии хӯлаи мазкур дар ҳарорати омӯхташудаи 623К ва 723К мувофиқан ба  $2,74 \cdot 10^{-4}$  ва  $3,75 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  баробар мебошад. Дар ин ҳолат қимати энергияи фаъоли самарабахш ба 102,3 кҶ/мол баробар аст (Ҷадвали 3.1).



**Расми 3.2** – Қаҷхатҳои кинетикии оксидшавии хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 (а), бо қалъагӣ чавҳаронидашуда, %-масса 0,01 (б); 0,05 (в), 0,1 (г); 0,5 (д), дар ҳолати сахтӣ

**Ҷадвали 3.1** – Параметрҳои кинетикӣ ва энергетикӣ ва раванди оксидшавии хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо қалбағӣ, дар ҳолати сахтӣ:

Миқдори қалбағӣ дар таркиби хӯла, мас.%	Ҳарорати оксидшавӣ, К	Суръати миёнаи оксидшавӣ $K \cdot 10^4, \text{кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	Энергияи фаёли самарабахш кҶ/мол
0.0	623.00	3.01	82.1
	673.00	3.60	
	723.00	4.02	
0.01	623.00	2.86	92.03
	673.00	3.45	
	723.00	3.87	
0.05	623.00	2.81	97.82
	673.00	3.40	
	723.00	3.82	
0.1	623.00	2.75	102.31
	673.00	3.35	
	723.00	3.77	
0.5	623.00	2.67	107.12
	673.00	3.29	
	723.00	3.70	



**Расми 3.3** – Қачхатҳои квадрати кинетикии оксидшавии хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 (а) бо қалъагӣ чавҳаронидашуда, %-масса: 0,01 (б); 0,05 (с); 0,1 (г); 0,5 (г), дар ҳолати сахтӣ

Дар расми 3.3 д қачхатҳои квадратии кинетикии оксидшавии хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо 0,5%- массаи қалъагӣ чавҳаронидашуда, дар ҳарорати 623К, 673К ва 723К нишон дода шудааст. Хусусияти қачхатҳо нишон медиҳад, ки оксидшавии хӯла мувофиқи қонуни гиперболӣ бо душвориҳои диффузия мегузарад. Ин раванд дар дақиқаи 15-ум ба охир мерасад. Суръати миёнаи оксидшавӣ дар ҳарорати 623 ва 723 К ба  $2,68 \cdot 10^{-4}$  ва  $3,69 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ , баробар мешаванд. Энергияи фаъоли самарабахш ба 107,10 кҶ/мол мерасад. Хусусияти ғайриростхаттагии қачхатҳои  $(\text{g/s})^2$ -t дар расми 3.3 аз хусусияти гиперболии раванди оксидшавӣ шаҳодат медиҳад.

**Ҷадвали 3.2** – Моделҳои математикии қачхатҳои квадратии кинетикаи оксидшавии хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо қалъагӣ чавҳаронидашуда, дар ҳолати сахтӣ:

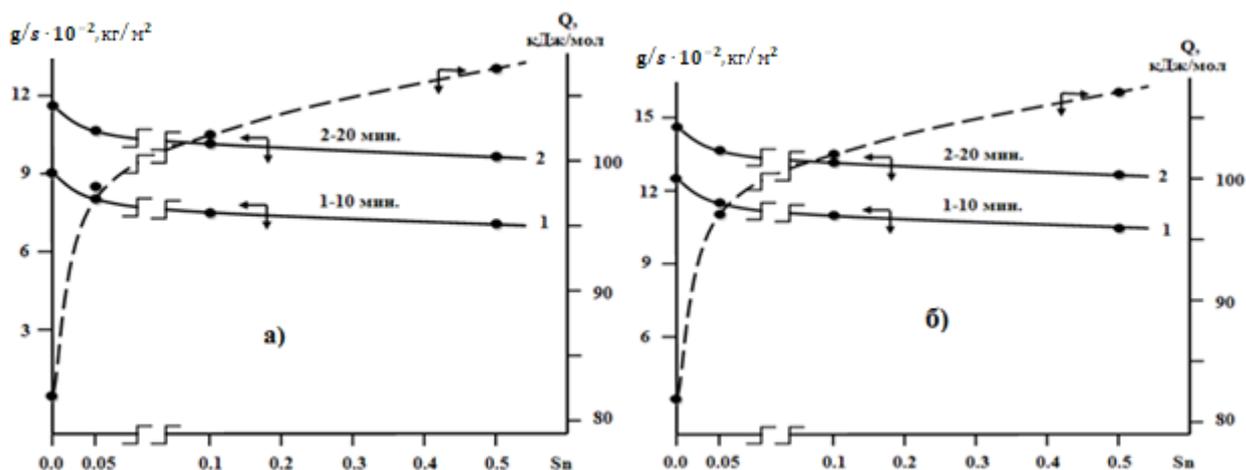
Миқдори қалъагӣ дар таркиби хӯла, мас.%	Ҳарорати оксидшавӣ, К	Полиномҳои қачхатҳои квадратии кинетикии оксидшавии хӯлаҳо	Коэффисиенти коррелятсия R
0.0	623	$y^* = -5 \cdot 10^{-5}x^3 - 0,033x^2 + 1,142x^{**}$	0,980
	673	$y = -0,001x^3 - 0,042x^2 + 1,358x$	0,985
	723	$y = -0,001x^3 - 0,077x^2 + 1,821$	0,991
0.01	623	$y = -4 \cdot 10^{-6}x^3 - 0,024x^2 + 1,029x$	0,980
	673	$y = -0,001x^3 - 0,04x^2 + 1,307x$	0,986
	723	$y = -0,001x^3 - 0,072x^2 + 1,732x$	0,990
0.05	623	$y = -2 \cdot 10^{-5}x^3 - 0,021x^2 + 0,966x$	0,983
	673	$y = -0,001x^3 - 0,036x^2 + 1,226x$	0,986
	723	$y = -0,001x^3 - 0,063x^2 + 1,611x$	0,988
0.1	623	$y = -9 \cdot 10^{-5}x^3 - 0,018x^2 + 0,887x$	0,984
	673	$y = -0,001x^3 - 0,033x^2 + 1,152x$	0,987
	723	$y = -0,002x^3 - 0,059x^2 + 1,532x$	0,988
0.5	623	$y = -6 \cdot 10^{-5}x^3 - 0,017x^2 + 0,849x$	0,987
	673	$y = -0,001x^3 - 0,030x^2 + 1,097x$	0,986
	723	$y = -0,002x^3 - 0,057x^2 + 1,475x$	0,990

Эзоҳ:  $y^*$  — афзоиши массаи намунаҳо аз хӯла  $((\text{g/s}, \text{кг}/\text{м}^2))$ ;

$x^{**}$  - давомнокии вақти оксидшавӣ, дақ.

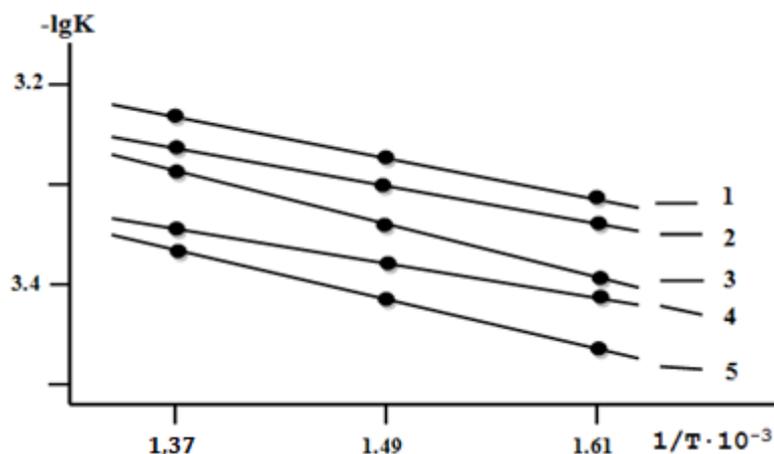
Аз ҷадвали 3.2 дида мешавад, ки полиномҳои қачхатҳои квадратии оксидшавии хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо муодилаи навъи  $y = kx^n$  тасвир шудаанд, ки дар он қимати  $n$  аз 1 то 3 тағйир меёбад, яъне раванди оксидшавиро муодилаи гиперболӣ тасвир мекунад.

Намудҳои оксидшавии изохронии хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3, ки бо қалъагӣ ҷавҳаронида шудаанд, дар расми 3.4 оварда шудаанд. Муайян гардид, ки бо афзоиши консентратсияи қалъагӣ дар таркиби хӯлаи асли суръати оксидшавӣ ҳам дар шароити нигоҳдории 10 дақиқай (қачхаттаи 1) ва ҳам дар шароити 20 дақиқай (қачхаттаи 2) дар атмосфераи оксидкунанда коҳиш меёбад. Ин қонуният махсусан дар ҳарорати 723К равшан зоҳир мегардад, ки нишондиҳандаи афзоиши энергияи фаъоли самарабахши оксидшавӣ бо зиёд шудани миқдори қалъагӣ дар хӯла мебошад.



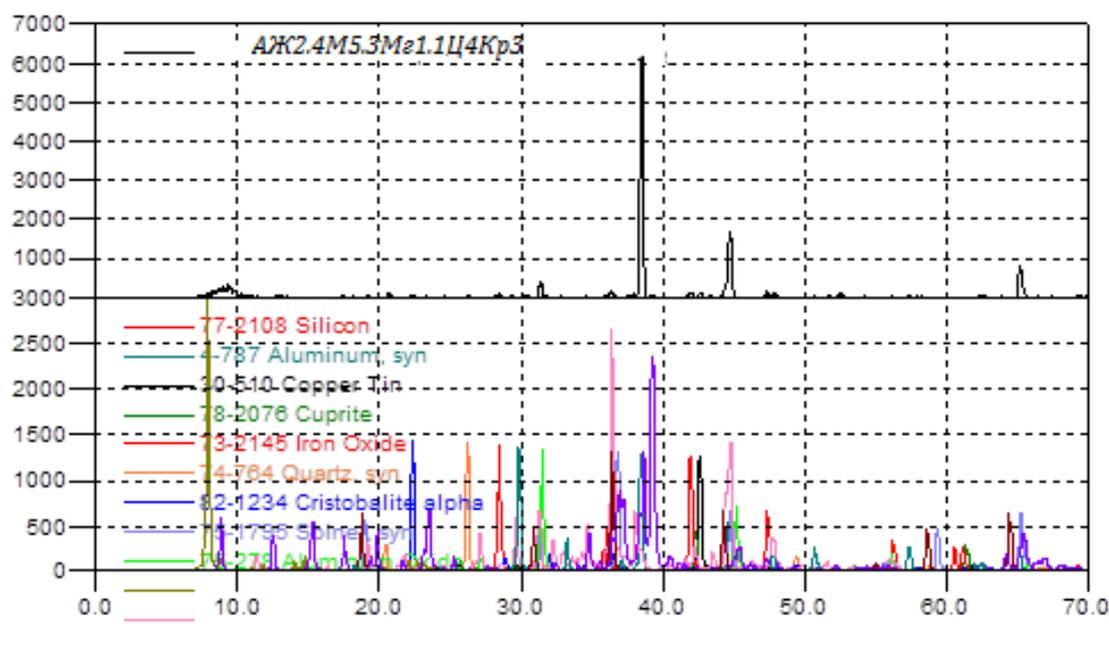
**Расми 3.4** – Изохронҳои оксидшавии хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо қалъагӣ дар ҳарорати 623К (а) ва 723К (б)

Дар расми 3.5 вобастагии  $-\lg K - 1/T$  барои хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 тасвир ёфтааст, ки дар таркибаш 0,01 ÷ 0,5 %- и масса қалъагӣ дорад, ва дорои вобастагии хаттӣ мебошад.



**Расми 3.5** – Вобастагии  $-\lg K$  аз  $1/T$  барои хӯлаи алюминии АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 (1), бо қалъагӣ чавҳаронидашуда, %-и масса: 0,01(2); 0,05(3); 0,1(4); 0,5(5).

Барои омӯзиши маҳсулоти оксидшавии хӯлаҳо мо усули таҳлили марҳилаи рентгениро бо истифодаи рентгени электрони ДРОН-3 истифода бурдем. Ҳамчун мисол спектри маҳсулоти оксидшавии хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1ц4Кр3, ки бо қалъагӣ чавҳаронида шудааст, дар расми 3.6 оварда шудааст.



**Расми 3.6** – Нақшаҳои дифраксионии маҳсулоти оксидшавии хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3, ки дар таркибашон 0,5 - % масса қалъагӣ доранд.

Дар асоси натиҷаҳои таҳлили фазавии рентгении маҳсулоти оксидшавии хӯла (расми 3.6) муайян карда шуд, ки ҳангоми оксидшавӣ оксидҳои таркибҳои зерин ба амал меоянд:  $\text{Cu}_2\text{O}$ ;  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ;  $\text{SiO}_2$ ;  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ ;  $\text{AlO}$ ;  $\text{Si}_{1,75}\text{Al}_{4,25}\text{O}_{20}$ ;  $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ ;  $\text{C}_n\text{O}$ .

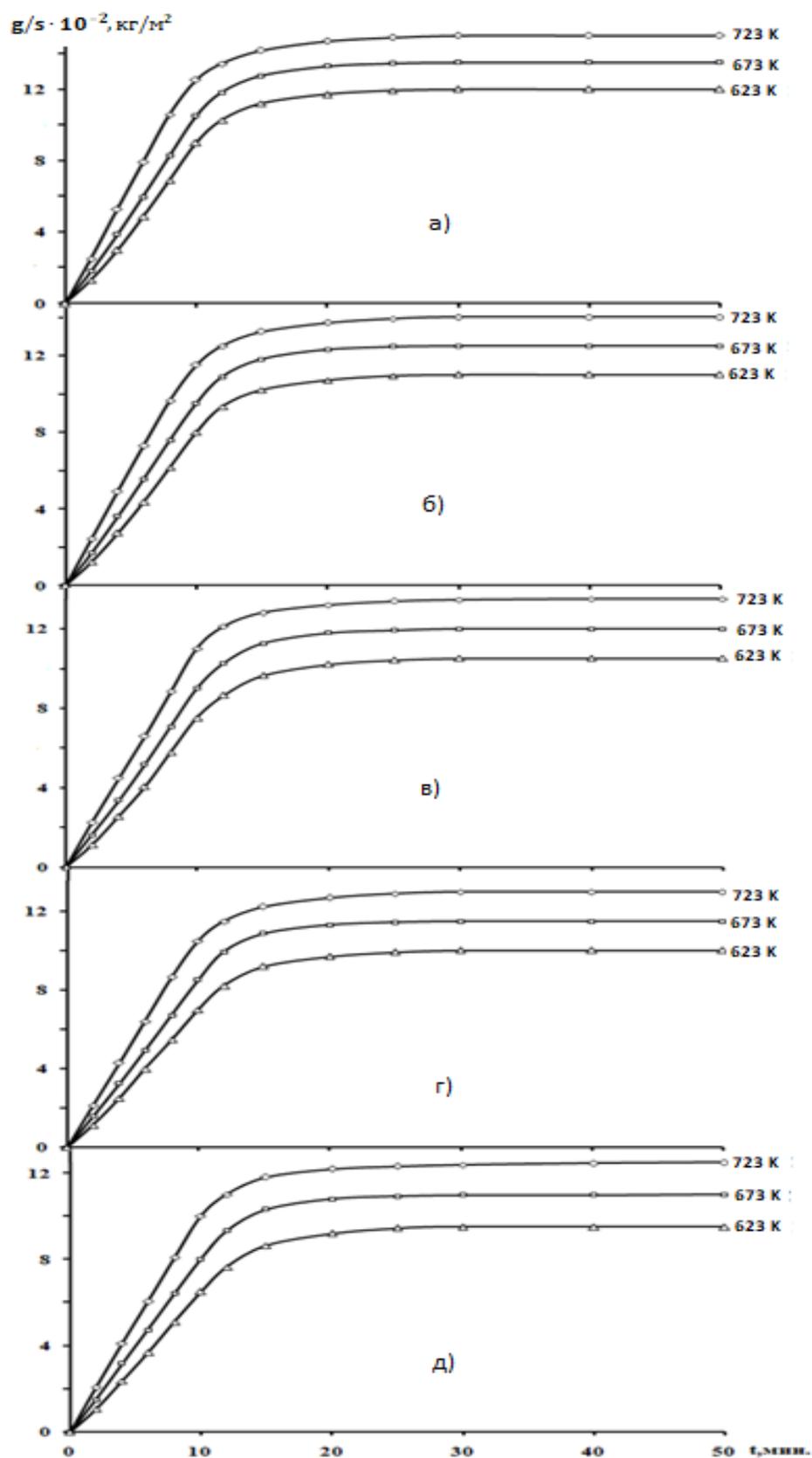
Дар умум ба хӯлаи аслии  $\text{AJ2.4M5.3Mg1.1Ц4Kp3}$  аз 0,01 то 0,5 %- масса илова кардани калбагӣ оксидшавии онро кам мекунад, ки ин аз ҷиҳати аз онҳо тайёр кардани конструксия, маснуот ва конструксияҳои, ки дар ҳарорати баланд кор мекунанд, умедбахш аст.

### **3.3. Кинетикаи оксидшавии хӯлаи алюминийи $\text{AJ2.4M5.3Mg1.1Ц4Kp3}$ бо сурб чавхаронидашуда**

Кинетикаи оксидшавии хӯлаи алюминийи  $\text{AJ2.4M5.3Mg1.1Ц4Kp3}$  бо сурб дар ҳолати сахт бо усули термогравиметрӣ омӯхта шуд. Хӯлаҳо барои омӯзиш дар печи муқовимати навъи СШОЛ гирифта шудаанд. Шихтҳо дар тарозуи аналитикии ARV-200 бо дақиқии  $0,1 \cdot 10^{-6}$  кг баркашида шуд.

Бо усули термогравиметрӣ таъсири байниҳамдигарии намунаҳои аз хӯлаи алюминийи  $\text{AJ2.4M5.3Mg1.1Ц4Kp3}$ , ки дар таркибашон аз 0,01 то 0,5 % - масса сурб дорад, бо оксигени фазаи газӣ омӯхта шуд. Натиҷаҳои тадқиқот дар расми 3.4 ва ҷадвали 3.3 нишон дода шудаанд.

Суръатҳои оксидшавии хӯлаҳои алюминийи ҳосилшуда аз рӯйи расандаҳо, ки ба якчанд нуктаи қачхатҳои оксидшавии кинетикӣ татбиқ карда шудаанд ва аз рӯйи тангенси кунҷи моилӣ ва бузургии энергияи фаъолшавии самарабахш аз вобастагии  $-\lg K - 1/T$  ҳисоб карда шуд. Натиҷаҳои тадқиқот дар ҷадвали 3.3 ва расми 3.4 нишон дода шудаанд.



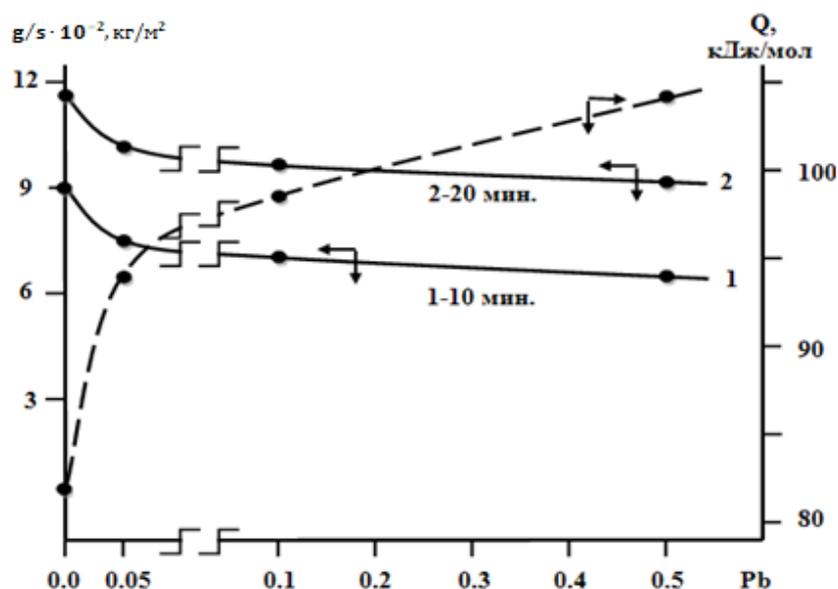
Расми 3.7 – Қаҷхатҳои кинетикии оксидшавии хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 (а), бо сурб чавҳаронидашуда, %-и масса: 0,01 (б); 0,05 (в), 0,1 (г); 0,5 (д), дар ҳолати сахтӣ.

**Чадвали 3.3** - Таъсири иловаҳои сурб ба параметрҳои кинетикӣ ва энергетикӣи раванди оксидшавии хӯлаи алюминий АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3:

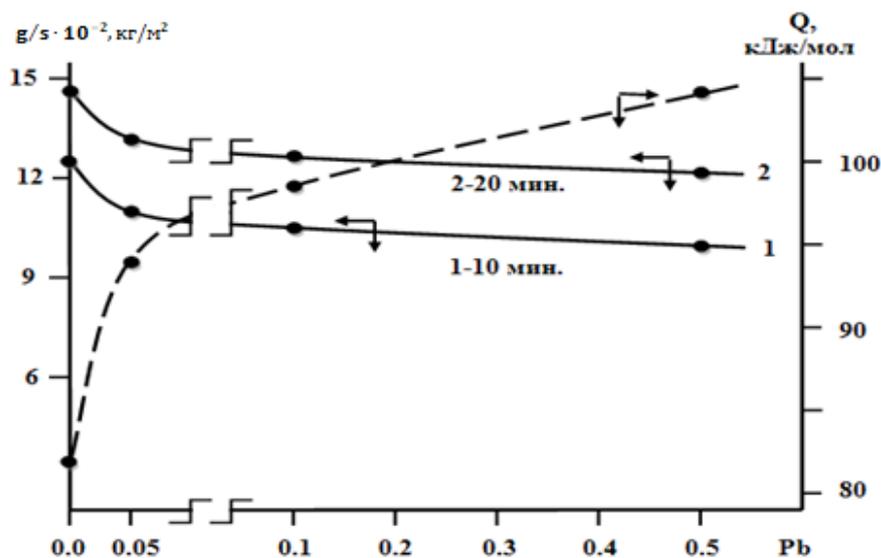
Миқдори сурб дар таркиби хӯла, %- масса	Ҳарорати оксидшавӣ, К	Суръати миёнаи оксидшавӣ $K \cdot 10^4, \text{кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	Энергияи намоёни фаъолсозӣ, кДж/моль
0.0	623	3.01	82.15
	673	3.60	
	723	4.02	
0.01	623	2.92	88.23
	673	3.51	
	723	3.89	
0.05	623	2.85	93.92
	673	3.42	
	723	3.87	
0.1	623	2.79	98.54
	673	3.48	
	723	3.76	
0.5	623	2.74	104.31
	673	3.43	
	723	3.75	

Қаҷхаттаҳои квадратии кинетикӣи оксидшавӣ ва алгоритмҳои онҳо барои хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3, ки дорои 0,1 ÷ 0,5 %-масса сурб мебошанд дар координатаҳои  $(g/s)^2-t$  дар расми 3.10 ва чадвали 3.4 оварда шудаанд.

Дар расмҳои 3.8 ва 3.9 оксидшавии изохронии хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3, ки бо сурб ҷавҳаронида шудааст, ба таври графикӣ нишон дода шудаанд. Суръати миёнаи оксидшавии хӯла бо афзоиши консентратсияи сурб коҳиш меёбад. Дар ин ҳолат, бо афзоиши консентратсияи компоненти лигарӣ қимати самараноки энергияи фаъолсозии хӯлаҳо зиёд мешаванд.

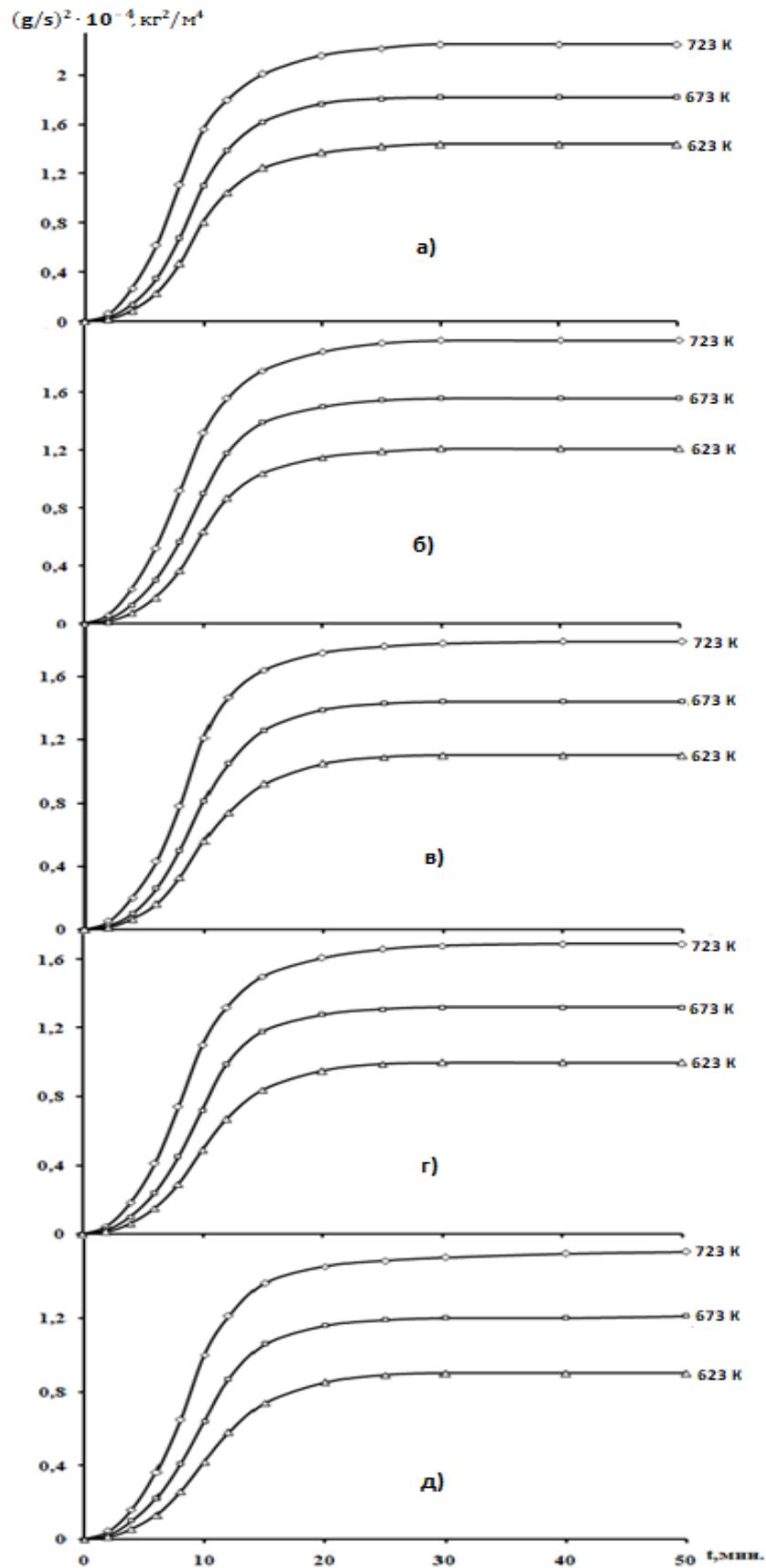


**Расми 3.8** – Оксидшавии изохронии хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо сурб дар ҳарорати 623 К



**Расми 3.9** – Оксидшавии изохронии хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо сурб дар ҳарорати 723 К

Дар расми 3.10 қачхаттаҳои квадрати кинетикии оксидшавии хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3, ки дар таркибашон 0,1 ÷ 0,5 % - масса сурб доранд, нишон дода шудаанд. Тадқиқот дар ҳарорати 623, 673К ва 723К гузаронида шудааст. Қимати суръати воқеии оксидшавии хӯлае, ки дар таркибаш 0,1 % - масса сурб дорад, дар ҳарорати 623 К ва 723 К, бузургиашон мувофиқан ба  $2,78 \cdot 10^{-4}$  ва  $3,79 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  баробар аст. Дар ин ҳолат қимати энергияи фаъолшавии самарабахш ба 98,5 кҶ/мол баробар мешавад (Ҷадвали 3.3).



**Расми 3.10** - Качхатҳои квадрати кинетикии оксидшавии хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 (а) бо сурб, % - масса: 0,01(б); 0,05 (с); 0,1 (г); 0,5 (д), дар ҳолати саҳтӣ

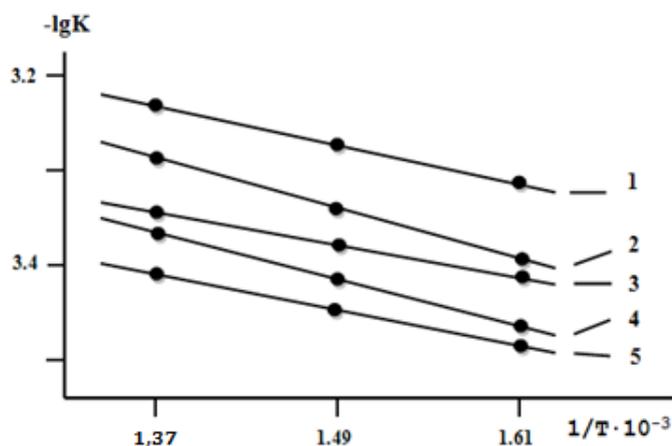
Дар расми 3.10 (д) қачхаттаҳои квадратии кинетикии оксидшавии хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо сурб 0,5 % - масса дар ҳарорати 623К, 673К ва 723К нишон дода шудааст. Хусусияти қачхаттаҳо нишон медиҳад, ки оксидшавии хӯла мувофиқи қонуни гиперболӣ бо душвориҳои диффузия чараён дорад ва дар дақиқаи 15-ум ба охир мерасад. Суръати воқеии оксидшавӣ дар ҳарорати 623 ва 723 К мувофиқан ба  $2,72 \cdot 10^{-4}$  ва  $3,73 \cdot 10^{-4}$  кг·м<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup> баробар аст. Энергияи фаъолсозии самарабахш ба 104,3 кҶ/мол мерасад. Табиати ғайриростхаттагии қачхаттаҳои (g/s)<sup>2</sup>-t дар расми 3.10 аз хусусияти гиперболии раванди оксидшавӣ шаҳодат медиҳад.

**Ҷадвали 3.4** – Натиҷаҳои коркарди қачхаттаҳои квадратии кинетикии оксидшавии хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо сурб дар ҳолати сахтӣ:

Миқдори сурб дар таркиби хӯла, мас.%	Ҳарорати оксидшавӣ, К	Полиномаҳои қачхаттаҳои квадратии кинетикии оксидшавии хӯлаҳо	Коэффитсиенти коррелятсия R
0.0	623	$y^* = -5 \cdot 10^{-5}x^3 - 0,033x^2 + 1,142x^{**}$	0,980
	673	$y = -0,001x^3 - 0,042x^2 + 1,358x$	0,985
	723	$y = -0,001x^3 - 0,077x^2 + 1,821x$	0,991
0.01	623	$y = -2 \cdot 10^{-5}x^3 - 0,021x^2 + 0,965x$	0,983
	673	$y = -0,001x^3 - 0,037x^2 + 1,242x$	0,987
	723	$y = -0,001x^3 - 0,069x^2 + 1,671x$	0,992
0.05	623	$y = -9 \cdot 10^{-5}x^3 - 0,018x^2 + 0,887x$	0,984
	673	$y = -0,001x^3 - 0,033x^2 + 1,152x$	0,987
	723	$y = -0,002x^3 - 0,059x^2 + 1,535x$	0,988
0.1	623	$y = -6 \cdot 10^{-5}x^3 - 0,017x^2 + 0,849x$	0,987
	673	$y = -0,001x^3 - 0,030x^2 + 1,097x$	0,986
	723	$y = -0,002x^3 - 0,057x^2 + 1,475x$	0,990
0.5	623	$y^* = -0,001x^3 - 0,014x^2 + 0,778x$	0,988
	673	$y = -0,001x^3 - 0,029x^2 + 1,042x$	0,989
	723	$y = -0,001x^3 - 0,053x^2 + 1,395x$	0,990

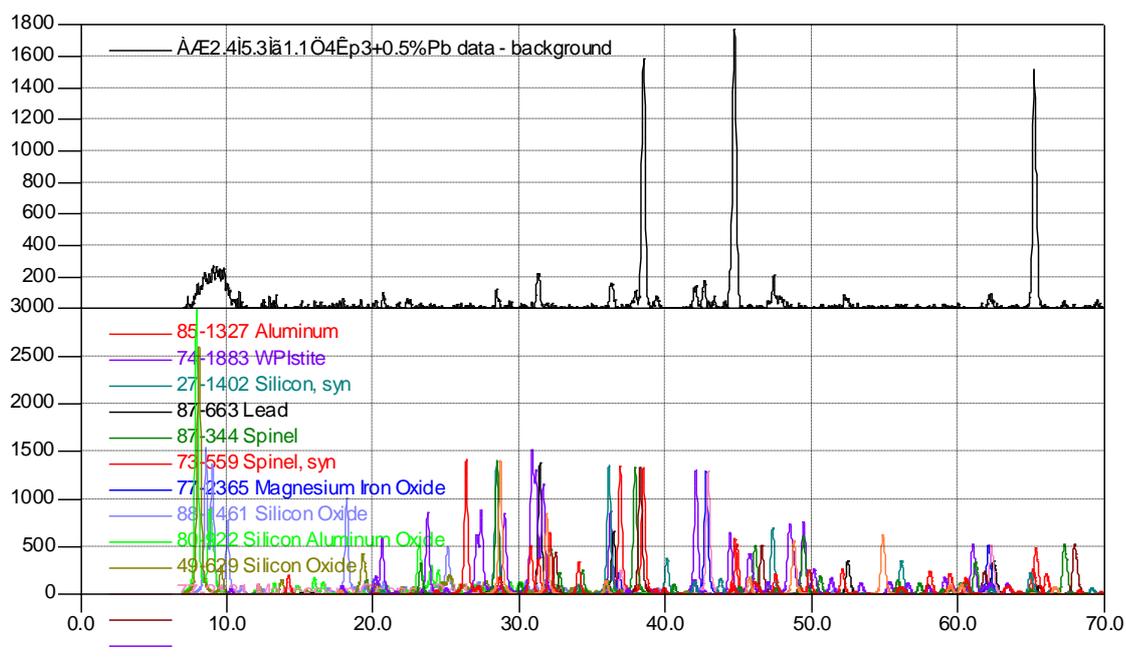
Эзоҳ:  $y^*$  — афзоиши массаи намунаҳо аз хӯла ((g/s, кг/м<sup>2</sup>);  
 $x^{**}$  - давомнокии вақти оксидшавӣ, дақиқа.

Дар расми 3.11 вобастагии логарифмии  $-\lg K - 1/T$  барои хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3, ки дар таркибаш 0.05; 0.01; 0.1; 0.5 % - масса сурб дорад, ва табиаташон хаттӣ мебошад, нишон дода шудааст.



**Расми 3.11** – Вобастагии  $-\lg K$  аз  $1/T$  барои хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3(1), бо сурб ҷавҳаронидашуда, мас. %: 0,01(2); 0,05(3); 0,1(4); 0,5(5).

Дар расми 3.12 спектрҳои маҳсулоти оксидшавии хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3, ки бо сурб ҷавҳаронида шудаанд, нишон дода шудааст.



**Расми 3.12** – Нақшаҳои дифраксионии маҳсулоти оксидшавии хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3, ки таркибашон дорои 0,5 % -и масса сурб мебошанд.

Дар асоси натиҷаҳои таҳлили фазавии рентгении маҳсулоти оксидшавии хӯла (расми 3.12) муайян карда шуд, ки ҳангоми оксидшавӣ оксидҳои таркибҳои зерин ба амал меоянд:  $\text{Fe}_{0.9646} \text{O}$ ;  $\text{Al}_{1.8} \text{O}_4$ ;  $\text{Al}_2 \text{MgO}_4$ ;  $(\text{MgO})_{0.91} (\text{FeO})_{0.09}$ ;  $(\text{SiO}_2)_{64}$ ;  $\text{Si}_{11.96} \text{Al}_{0.04} \text{O}_{24}$ ;  $\text{Si}_{16} \text{O}_{32}$ ;  $\text{Mg}_{0.90} \text{Cu}_{0.10} \text{O}$ ;  $\text{Mg}_2 (\text{SiO}_4)$ ;  $\text{Pb}_{36} ((\text{Si}_2 \text{O}_7)_6 (\text{Si}_4 \text{O}_{13})_3 \text{O}_3)$ ;  $\text{Pb}_2 \text{SiO}_4$ ;  $\text{Pb}_{0.98} \text{O}_2$ ;  $\text{Pb}_3 \text{O}_4$ ;  $\text{PbO}$ ;

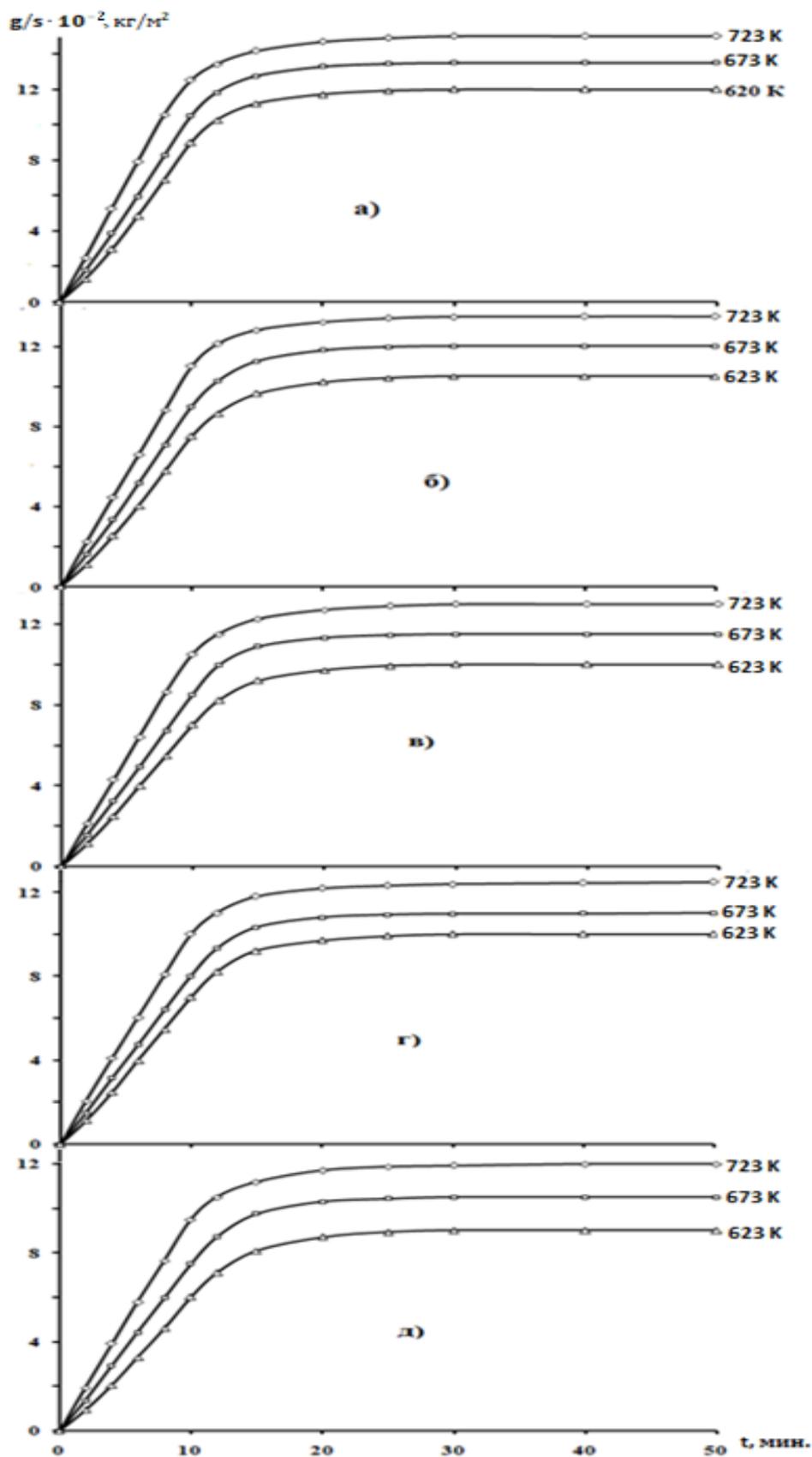
Мувофиқи тадқиқоти таҷрибавии кинетикаи оксидшавӣ муқаррар карда шудааст, ки иловаҳои сурб суръати оксидшавии хӯлаи аслиро кам мекунанд.

### **3.4. Таъсири висмут ба кинетикаи оксидшавии хӯлаи алюминийи**

#### **АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3, дар ҳолати сахтӣ**

Бо истифода аз усули дар боло овардашуда кинетикаи оксидшавии хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3, ки бо висмут ҷавҳаронида шудааст, омӯхта шуд.

Микдори висмут дар хӯлаи аслии 0,01÷0,5 % - масса буд. Натиҷаҳои омӯзиши кинетикаи оксидшавии хӯлаҳо дар ҳолати сахт дар расмҳои 3.13-3.17 ва ҷадвалҳои 3.5 ва 3.6 оварда шудаанд.

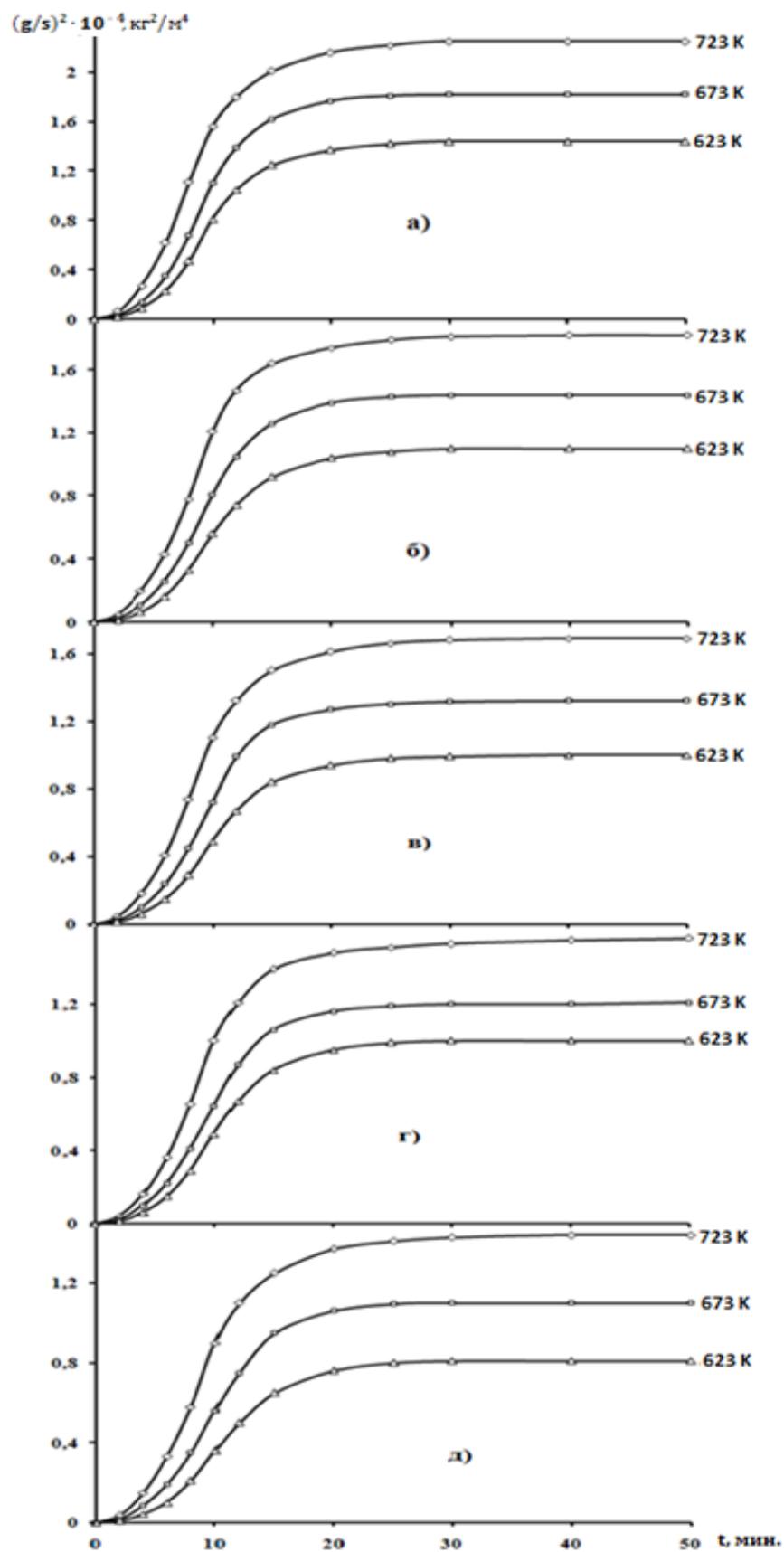


**Расми 3.12** – Качхаттаҳои кинетикаи оксидшавии хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3(1) бо висмут чавҳаронидашуда, % - масса: 0.01(2); 0,05(3); 0,1(4); 0,5 (5), дар ҳолати сахтӣ.

Муқаррар карда шудааст, ки ҳангоми ба хӯлаи аслии АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 илова кардани висмут, суръати оксидшавии онро паст мекунад.

**Ҷадвали 3.5** – Параметрҳои кинетикӣ ва энергетикӣ ва раванди оксидшавии хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо висмут, дар ҳолати сахтӣ:

Миқдори висмут дар таркиби хӯла, мас.%	Ҳарорати оксидшавӣ, К	Суръати воқеии оксидшавӣ $K \cdot 10^4$ , $\text{кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	Энергияи фаъолсозии самарабахш, кДж/моль
0.0	623	3.01	82.15
	673	3.60	
	723	4.02	
0.01	623	2.98	85.92
	673	3.57	
	723	3.99	
0.05	623	2.94	90.34
	673	3.53	
	723	3.96	
0.1	623	2.89	96.53
	673	3.45	
	723	3.86	
0.5	623	2.83	100.25
	673	3.45	
	723	3.87	

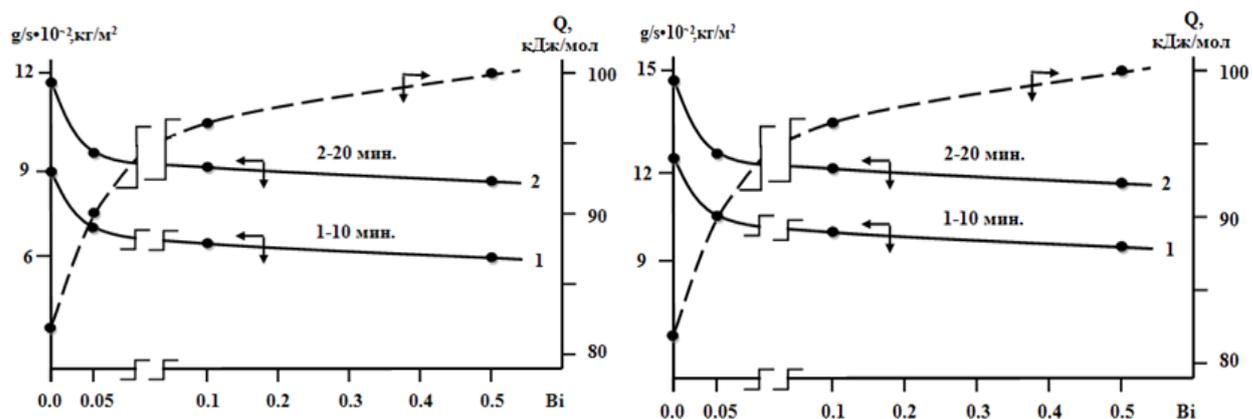


**Расми 3.14** – Қаҷхатгаҳои оксидшавии кинетикии ҳӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 (а) бо висмут, % - масса: 0,01 (б); 0,05 (в); 0,1 (г); 0,5 (г), дар ҳолати сахтӣ.

**Ҷадвали 3.6** – Полиномаҳои каҷхаттаҳои оксидшавии кинетикии квадратӣ хӯлаи алюминий АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3, бо висмут чавхаронидашуда:

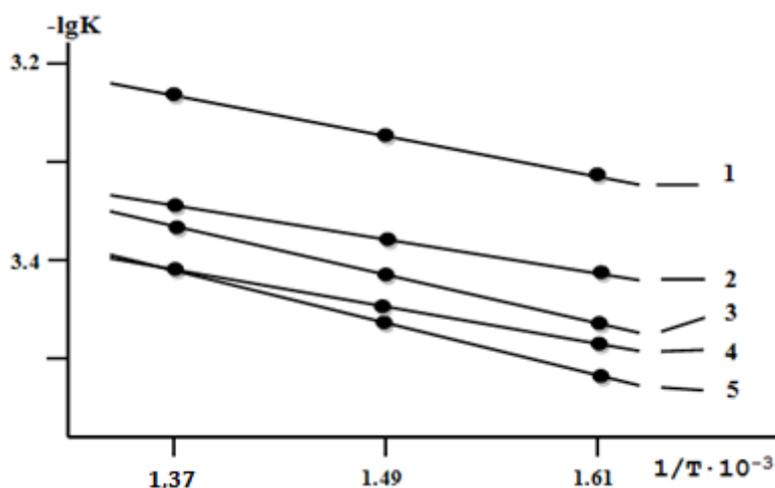
Миқдори висмут дар таркиби хӯла, мас.%	Ҳарорати оксидшавӣ, К	Полиномаҳои каҷхаттаҳои квадратии кинетикии оксидшавии хӯлаҳо	Кoeffитсиент и коррелятсия R
0.0	623	$y^* = -5 \cdot 10^{-5}x^3 - 0,033x^2 + 1,142x^{**}$	0,980
	673	$y = -0.001x^3 - 0,042x^2 + 1,358x$	0,985
	723	$y = -0.001x^3 - 0,077x^2 + 1,821x$	0,991
0.01	623	$y = -9 \cdot 10^{-5}x^3 - 0,018x^2 + 0,887x$	0,984
	673	$y = -0.001x^3 - 0,032x^2 + 1,151x$	0,987
	723	$y = -0.002x^3 - 0,059x^2 + 1,535x$	0,988
0.05	623	$y = -6 \cdot 10^{-5}x^3 - 0,017x^2 + 0,849x$	0,987
	673	$y = -0.001x^3 - 0,030x^2 + 1,097x$	0,986
	723	$y = -0.002x^3 - 0,057x^2 + 1,475x$	0,990
0.1	623	$y = -6 \cdot 10^{-5}x^3 - 0,017x^2 + 0,849x$	0,987
	673	$y = -0.001x^3 - 0,029x^2 + 1,042x$	0,989
	723	$y = -0.002x^3 - 0,053x^2 + 1,395x$	0,990
0.5	623	$y = -0.001x^3 - 0,009x^2 + 0,684x$	0,987
	673	$y = -1 \cdot 10^{-4}x^3 - 0,024x^2 + 0,955x$	0,990
	723	$y = -0.002x^3 - 0,049x^2 + 1,318x$	0,991

Сохтани изохронҳои оксидшавии хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3, бо висмут, дар ҳарорати 623К ва 723К нишон дод, ки дар баробари зиёд кардани элементи лигарӣ дар хӯлаи ибтидоии АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3, афзоиши вазни намунаҳо кам шуда, бузургии самараноктарини энергияи намоёни фаъолшавии раванди оксидшавӣ зиёд мешавад (расми 3.15)



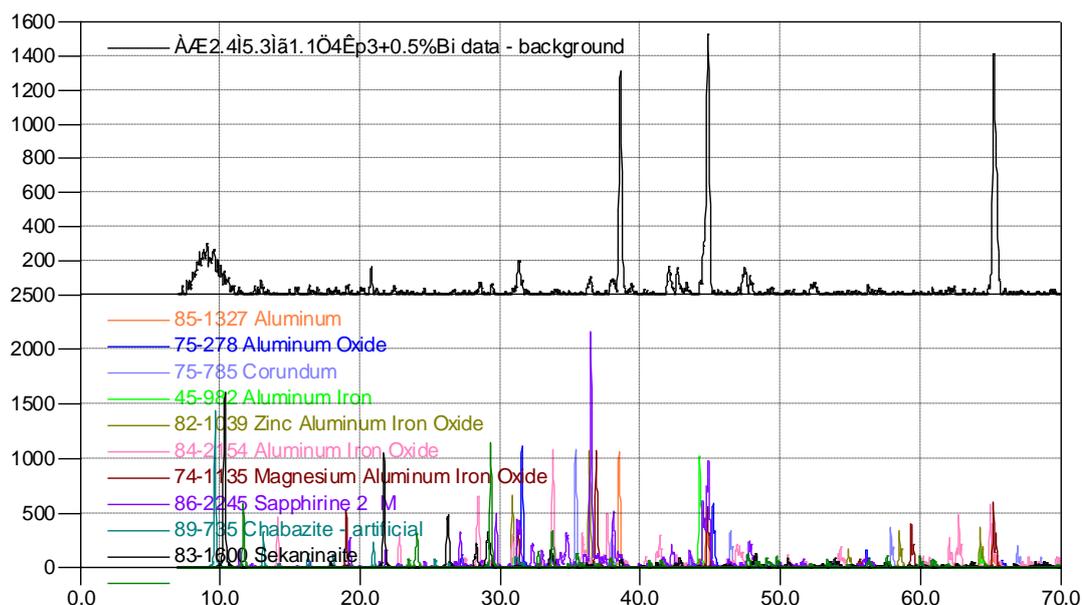
**б) б)**  
**Расми 3.15**—Изохронҳои оксидшавии хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо висмут дар ҳарорати 623К ва 723К

Дар расми 3.16 вобастагии логарифмии  $-\lg K$  аз  $1/T$  барои хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3, ки 0,01; 0,05; 0,1; 0,5 %-и масса висмут дорад, нишон дода шудааст, ки аз тангенсҳои моилии он қимати энергияи фаъолшавии самарабахши оксидшавии хӯлаҳо муайян карда шудааст.



**Расми 3.16** – Вобастагии  $-\lg K$  аз  $1/T$  барои хӯлаи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3(1), бо висмут, %-и масса 0,01(2); 0,05(3); 0,1(4); 0,5(5).

Дар расми 3.17 спектрҳои маҳсулоти оксидшавии хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3, ки бо висмут ҷавҳаронида шудаанд, оварда шудаанд.



**Расми 3.17** – Нақшаҳои дифраксионии маҳсулоти оксидшавии хӯлаи алюминийи  $Al_{2.4}Mg_{5.3}Mg_{1.1}Cr_3+0.5\%Bi$ , ки дорои 0,5 %-и масса висмут мебошанд.

Аз рӯи натиҷаҳои ба даст омадаи таҳлили марҳилаи рентгении маҳсулоти оксидшавии хӯлаҳо (расми 3.17) муайян карда шуд, ки дар ҳолати оксидшавӣ оксидҳои зерин ба амал меоянд:  $Al_2O_3$ ;  $Al_2O_3$ ;  $Zn(Al_{1.4}Fe_{0.6})O_4$ ;  $AlFeO_3$ ;  $MgAl_{1.9}Fe_{1.1}O_4$ ;  $Si_{1.75}Al_{4.25}O_{20}$ ;  $SiO_2$ ;  $Mg_{0.34}Fe_{1.66}Al_4Si_5O_{18}$ ;  $Bi_2O_2SiO_3$ .

Дар натиҷаи тадқиқот муқаррар карда шуд, ки бо зиёд шудани миқдори висмут дар таркиби хӯлаи аслии алюминийи  $Al_{2.4}Mg_{5.3}Mg_{1.1}Cr_3$ , суръати оксидшавӣ коҳиш меёбад, дар ҳоле ки самаранокии энергияи фаъолгардонӣ афзоиш меёбад.

### 3.5. Хулосаи боби 3

Масъалаи таъсири мутақобилаи хӯлаҳои металлӣ бо муҳитҳои фаъол дар ҳарорати баланд аҳамияти калон дорад, зеро бештари металлҳо ва хӯлаҳои дар соҳаи технология истифодашаванда зерин таъсири зангзанӣ ё оксидшавӣ дар ҳарорати баланд вайрон мешаванд. Тадқиқоти раванди оксидшавӣ дар чунин шароитҳо имкон медиҳад, ки ин равандҳо амиқ тафсир ва баҳо дода шаванд. Омили асосии боздошти ин раванд хосиятҳои физикӣ-химиявӣ ва кристаллии оксиди ҳосилшуда мебошад. Агар ҳаҷми оксиди ҳосилшуда аз ҳаҷми хӯла

камтар бошад, плёнкаи оксидии пайваста ҳосил намешавад, балки плёнкаи ковок ташаккул меёбад, ки имкони воридшавии озоди оксигенро фароҳам меорад ва раванди оксидшавиро тавассути сӯрохиҳо шитоб медиҳад. Агар маҳсулоти оксидшавӣ моддаҳои саҳти ноустувор бошанд, онҳо дар сатҳи берунии намуна ҷой гирифта, қабати муҳофизатии оксидро ташкил медиҳанд. Дар сурати набудани ковокӣ, диффузия танҳо тавассути фазои саҳт мегузарад. Ҳузури элементи лигарӣ дар таркиби оксиди муҳофизатӣ ҳаракати моддаҳоро маҳдуд карда, суръати умумии оксидшавиро паст мекунад.

Аз рӯйи вобастагии ғайрихаттӣ  $(g/s)^2 - t$  оксидшавии хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3, ки бо қалъагӣ, сурб ва висмут ҷавҳаронида шудааст, қачхатҳои кинетикии оксидшавӣ ба хатҳои рост мувофиқат намекунанд. Ин натиҷаҳо нишон медиҳанд, ки раванди оксидшавӣ аз рӯйи қонуни гиперболий ҷараён дорад. Натиҷаҳои таҳлили аналитикии қачхатҳои квадрати оксидшавӣ, ки дар ҷадвали 3.7 бо мисоли хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3, ки бо массаи 0,1 ва 0,5 % Sn, Pb ва Bi оварда шудаанд, гувоҳӣ медиҳанд. Қачхатҳои вобастагӣ  $(g/s)^2 - t$  ба муодилаи  $Y = kt^n$  иттиҷ мекунанд, ки дар он  $n$  вобаста ба таркиби хӯлаи оксидшаванда аз 2 то 4 фарқ мекунад (Расмҳои 3.3, 3.10 ва 3.14, Ҷадвали 3.1, 3.3 ва 3.5).

Дар ҷадвали 3.8 бузургҳои энергияи фаъолшавии самарабахши раванди оксидшавии хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо қалъагӣ, сурб ва висмут бо консентратсияи гуногун ҷамъбаст карда шудааст. Дар байни элементҳои лигарикунанда, хӯлаҳои бо қалъагӣ баландтарин энергияи фаъолкунии самарабахшро доранд.

**Қадвали 3.7** – Полиномаҳои қачхатҳои квадратии кинетикаи оксидшавии хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо қалъагӣ, сурб ва висмут дар ҳолати сахтӣ:

Миқдори Рb ва Вi дар хула, %-и масса	Ҳарорати оксидшавӣ, К	Муодила	Коэффитсиенти Коррелятсия, R <sup>2</sup>
0.0	623	$y^* = -5 \cdot 10^{-5}x^3 - 0,033x^2 + 1,142x^{**}$	0,980
	673	$y = -0,001x^3 - 0,042x^2 + 1,358x$	0,985
	723	$y = -0,001x^3 - 0,077x^2 + 1,821$	0,991
0.1 Sn	623	$y = -9 \cdot 10^{-5}x^3 - 0,018x^2 + 0,887x$	0,984
	673	$y = -0,001x^3 - 0,033x^2 + 1,152x$	0,987
	723	$y = -0,002x^3 - 0,059x^2 + 1,532x$	0,988
0.5 Sn	623	$y = -6 \cdot 10^{-5}x^3 - 0,017x^2 + 0,849x$	0,987
	673	$y = -0,001x^3 - 0,030x^2 + 1,097x$	0,986
	723	$y = -0,002x^3 - 0,057x^2 + 1,475x$	0,990
0.1 Pb	623	$y = -6 \cdot 10^{-5}x^3 - 0,017x^2 + 0,849x$	0,987
	673	$y = -0,001x^3 - 0,030x^2 + 1,097x$	0,986
	723	$y = -0,002x^3 - 0,057x^2 + 1,475x$	0,990
0.5 Pb	623	$y^* = -0,001x^3 - 0,014x^2 + 0,778x$	0,988
	673	$y = -0,001x^3 - 0,029x^2 + 1,042x$	0,989
	723	$y = -0,001x^3 - 0,053x^2 + 1,395x$	0,990
0.1 Bi	623	$y = -6 \cdot 10^{-5}x^3 - 0,017x^2 + 0,849x$	0,987
	673	$y = -0,001x^3 - 0,029x^2 + 1,042x$	0,989
	723	$y = -0,002x^3 - 0,053x^2 + 1,395x$	0,990
0.5 Bi	623	$y = -0,001x^3 - 0,009x^2 + 0,684x$	0,987
	673	$y = -1 \cdot 10^{-4}x^3 - 0,024x^2 + 0,955x$	0,990
	723	$y = -0,002x^3 - 0,049x^2 + 1,318x$	0,991

**Ҷадвали 3.8** – Параметрҳои кинетикӣ ва энергетикӣи раванди оксидшавии хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо қалъагӣ, сурб ва висмут, дар ҳолати сахтӣ:

Микдори Sn, Pb ва Bi дар таркиби хӯла %-и масса  Система	0,0	0,01	0,05	0,1	0,5
АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3+Sn		92.0	97.8	102.3	107.1
АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3+Pb	82.1	88.2	93.9	98.5	104.3
АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3+Bi		85.9	90.3	96.5	100.2

Дар асоси омӯзиши кинетикаи оксидшавии хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо қалъагӣ, сурб ва висмут дар ҳолати сахт, қонуниятҳои зерин муайян карда шуданд: раванди оксидшавӣ ба қонуни гиперболӣ иттиҳот мекунад, ки суръати воқеии он дар тартиби  $10^{-4} \text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{сек}^{-1}$ ; мебошад. Ҳамзамон муайян гардид, ки хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 дорои хурдтарин суръати оксидшавӣ буда, баландтарин суръат дар хӯлаҳои бо сурб ҷавҳаронидашуда мушоҳида мегардад.

## **БОБИ IV. РАФТОРИ КОРРОЗИОНӢ-ЭЛЕКТРОКИМИӢВИИ ХӢЛАИ АЛЮМИНИИ АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 БО ҚАЛЪАГИ, СУРЪ ВА ВИСМУТ ЧАВӢАРЕНИДАШУДА**

### **4.1. Усули потенциостатикӣ тадқиқоти коррозсионӣ-электрокимиӢвӣ сохти хӢлаи алюминий дар муҳити ишқорӣ NaCl**

Усули ба даст овардани хӢла дар боби 2.1 нишон дода шудааст. Аз ғудохтаи хӢлаи мазкур дар қолабҳои графити бо усули рехтагарӣ намунаҳоро, ки қутрашон 8 мм ва дарозияшон 120 мм мебошад, ҳосил намудем. Дар рафти омӯзиш қисми нолозими намунаҳо бо қатрон (смола) аз омехтаи канифол бо парафин дар таносуби 50:50 рӯйпуш карда шуд. Қисми кории электродҳо аввал ба воситаи санғоғазҳо тоза ва суфта гардиданд. Баъдан, дар маҳлули 10%-и NaOH заҳролуд намуда, бо спирт шуста, ба маҳлули NaCl андохта шуд [117].

Усули ҳосил намудани хӢлаҳо дар боби 2 оварда шудааст. Аз хӢлаҳои тадқиқшаванда намунаҳои цилиндршакле бо дарозии 140мм ва қутри 8мм омода карда шуданд, ки қисми паҳлуии онҳо ҳамчун электроди корӣ истифода гардид. Тадқиқоти электрохимиявӣ дар речаи потенциодинамикӣ бо суръати тағйири потенциал 2 мВ/с дар таҷҳизоти потенциостати ПИ-50-1.1, бо истифода аз асбоби худсабткунандаи ЛҚД-4 ва барномасозии ПР-8 анҷом дода шуд. Дар ин таҷриба, электроди нуқра-хлорӣ ҳамчун электроди муқоисавӣ ва платина ҳамчун электроди ёрирасон истифода гардиданд [118, 119].

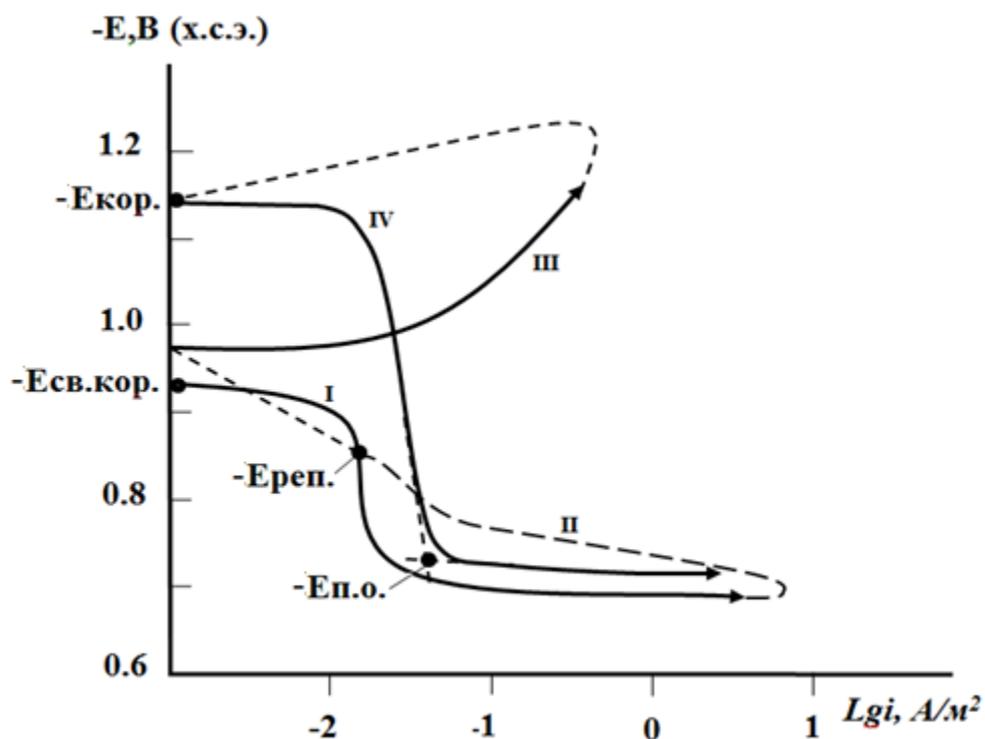
Барои гузаронидани тадқиқоти электрохимиявӣ, намунаҳо бо усули потенциодинамикӣ дар самти афзоиши мусбии потенциал поляризатсия карда шуданд. Поляризатсия то лаҳзаи ба қайд гирифтани афзоиши шадиди ҷараён, ки дар натиҷаи ташаккули питингҳо ба амал меояд, идома дода шуд (расми 4.1, қачхатаи I). Сипас, намунаҳо дар самти муқобил поляризатсия (расми 4.1, қачхатаи II) карда шуда, дар буриши қачхатаҳои I ва II бузургии потенциали репассиватсия муайян карда шуд. Баъдан, аз рӯйи ҳудудҳои катодӣ то қимати потенциали -1,3В барои ҷудо намудани пардаҳо (плёнқаҳо)-и оксидӣ аз сатҳи электрод (расми 4.1, қачхатаи III) дар натиҷаи ҷудошавии ишқор дар сатҳи

электрод ба амал меояд (расми 4.1, қачхаттаи IV). Ниҳоятан, намунаҳо аз нав дар самти мусбат поляризида шуда, аз рӯи қачхаттаи анодии бузургҳои асосии электрохимиявӣ муайян карда шуданд [120].

Ҳисоби зичии ҷараёни зангзанӣ аз рӯи қачхаттаҳои катодӣ бо назардошти моилии таффели  $b_k = 0,12$  В ба роҳ монда шуд. Дар муҳити мазкур, раванди ташаккули питингии коррозияи хӯлаҳои алюминий асосан тавассути реаксияи катодии ионизатсияшавии оксиген танзим мешавад. Суръати умумии коррозия тибқи ифодаи зерин ҳисоб карда мешавад:

$$K = i_{\text{корр}} \cdot k, \quad \text{дар ин ҷо } k = 0,335 \text{ г/А} \cdot \text{соат барои алюминий [121]/}$$

Диаграммаи пурраи қачхаттаи поляризидашавии (2 мВ/с) хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо қалъагӣ ҷавҳаронидашуда дар муҳити 0,03%-и электролити NaCl расми 4.1 оварда шудааст.



**Расми 4.1** – Қачхаттаи поляризидашавии (2 мВ/с) хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо қалъагӣ ҷавҳаронидашуда дар муҳити 0,03%-и электролити NaCl

## **4.2 Таъсири калъагӣ ба рафтори анодии хӯлаи алюминийи**

### **АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3, дар муҳити электролити NaCl**

Таъсири иони Cl ба рафтори зангзанию электрохимиявии хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3, бо калъагӣ чавҳаронидашуда дар маҳлули NaCl бо концентратсияи 3.0, 0.3 ва 0.03 вазн. % тадқиқ карда шудааст.

Натиҷаҳое, ки ҳангоми омӯзиши рафтори анодии хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3, ки дар таркибашон миқдори гуногуни калъагӣ доранд, ба даст омадаанд, дар расмҳои 4.2, 4.3 ва ҷадвалҳои 4.1, 4.2 нишон дода шудааст.

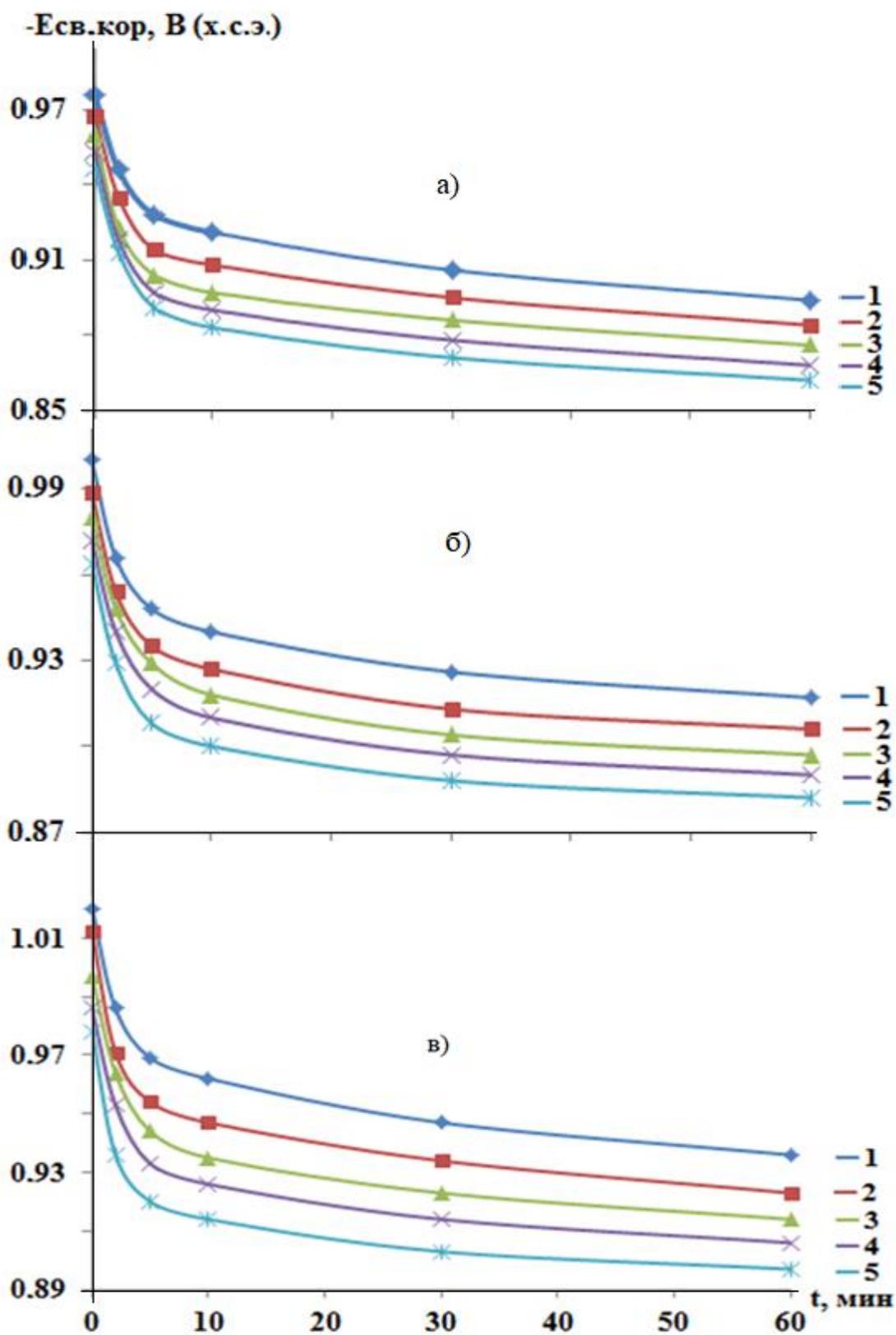
Таҳлили ҷадвали мазкур (4.1) нишон медиҳад, ки бо зиёдшавии миқдори элементҳои чавҳарӣ дар таркиби хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 потенциали коррозионию электрохимиявии хӯлаҳо дар муҳитҳои электролити 0,03, 0,3 ва 3,0 %-и маҳлули NaCl ба самти мусбат майл мекунад. Муқаррар карда шуд, ки то 0,5 % миқдори калъагӣ аз 10 то 15% суръати коррозияи хӯлаи ибтидоии АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3-ро паст менамояд.

Ҳангоми омӯзиши рафтори зангзанию электрохимиявии хӯлаҳои мазкур, вобастагии потенциали электрод аз вақт дар давоми як соати нигоҳдори дар электролит омӯхта шуд. Натиҷаҳои тадқиқот нишон дод, ки хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо калъагӣ чавҳаронидашуда дар потенциали озоди зангзанӣ дар муҳити тадқиқотӣ ба самти мусбат ҳаракат мекунад (ҷадвали 4.1 ва расми 4.2).

Ҳангоми ғӯтонидани намуна дар муҳити электролити 0.03, 0,3 ва 3% NaCl, потенциали озод зангзанӣ ба самти қиматҳои мусбат мегузарад. Нигоҳдории минбаъда дар муддати як соат боиси таъсири потенциали статсионарӣ мегардад, ки ба ҳосилшавии плёнкаи муҳофизатӣ дар қабати болои намунаҳо алоқаманд аст.

**Ҷадвали 4.1** – Потенсиали (х.с.э.) озоди коррозия ( $-E_{\text{св.кор.}}$ , В) вобаста аз ҳарорат барои хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо қалъагӣ ҷавҳаронидашуда, дар муҳити электролитии 0,03; 0,3 ва 3,0%-и NaCl:

Муҳити NaCl, бо %	Вақти нигоҳдорӣ, дақ.	Миқдори қалъагӣ дар хӯла, мас.%				
		0.0	0.01	0.05	0.1	0.5
0,03	0	0,976	0,968	0,960	0,953	0,946
	1/2	0,957	0,947	0,936	0,931	0,924
	2	0,946	0,935	0,923	0,918	0,913
	5	0,928	0,914	0,904	0,897	0,891
	10	0,921	0,908	0,897	0,890	0,883
	20	0,913	0,902	0,892	0,884	0,877
	30	0,906	0,895	0,886	0,878	0,871
	40	0,896	0,890	0,880	0,873	0,867
	50	0,895	0,887	0,878	0,869	0,865
	60	0,894	0,884	0,876	0,868	0,862
0,3	0	1,000	0,989	0,980	0,972	0,964
	1/2	0,980	0,969	0,957	0,950	0,941
	2	0,966	0,954	0,948	0,940	0,929
	5	0,948	0,935	0,929	0,920	0,908
	10	0,940	0,927	0,918	0,910	0,900
	20	0,932	0,920	0,914	0,903	0,892
	30	0,926	0,913	0,904	0,897	0,888
	40	0,923	0,908	0,899	0,893	0,885
	50	0,919	0,907	0,897	0,890	0,883
	60	0,917	0,906	0,897	0,890	0,882
3,0	0	1,020	1,012	0,997	0,986	0,978
	1/2	1,000	0,985	0,975	0,965	0,947
	2	0,986	0,971	0,964	0,953	0,936
	5	0,963	0,954	0,944	0,933	0,920
	10	0,956	0,947	0,935	0,926	0,914
	20	0,950	0,940	0,928	0,920	0,907
	30	0,945	0,934	0,923	0,914	0,903
	40	0,940	0,928	0,917	0,908	0,899
	50	0,936	0,924	0,914	0,907	0,897
	60	0,936	0,923	0,914	0,906	0,897



**Расми 4.2** – Вобастагии потенциали озоди зангзании хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 (1) аз вақт ва миқдори қалъағӣ, %- масс.: 0,01 (2), 0,05 (3), 0,1 (4), 0,5 (5), дар муҳити электролитӣ 0,03 (а), 0,3 (б) ва 3 (с) %-и NaCl.

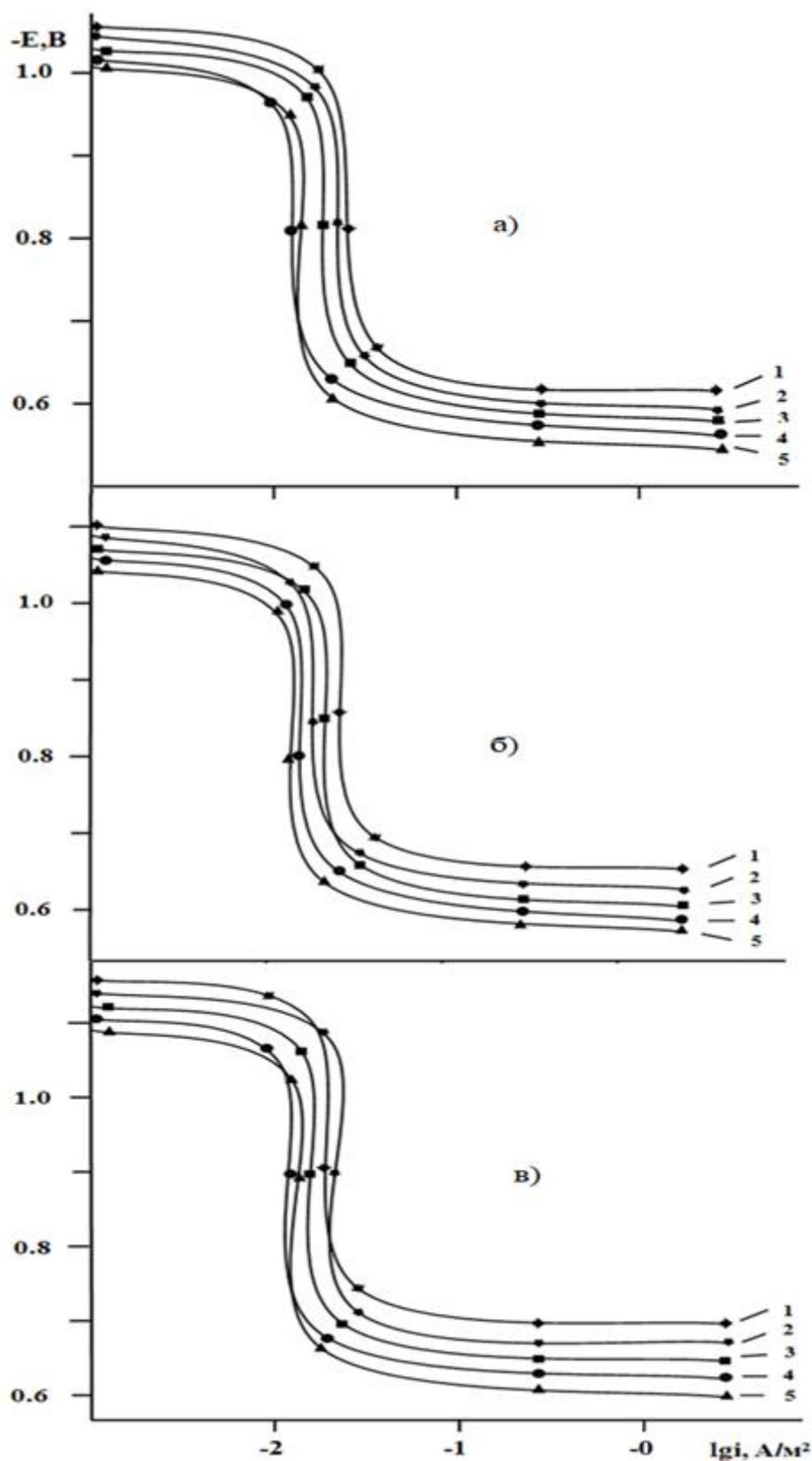
Хусусиятҳои электрохимиявии хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3, бо қалбағӣ чавҳаронидашуда, бо суръати тобиши потенциал 2 мВ/с бо таври пурра дар чадвали 4.2 нишондода шудааст. Чӣ тавре, ки аз чадвал маълум аст, иловаи қалбағӣ ба хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 потенциали зангзанӣ, питингҳосилкунӣ ва репассиватсияро каме ба минтақаи мусбат мекуҷонад.

Суръати зангзанӣ, потенциодинамикии қачхаттаҳои анодии хӯла ҳисоб карда шудааст, натиҷаҳо нишон медиҳад, ки иловаҳои қалбағӣ суръати зангзании хӯлаи аслии АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3-ро 15-30% коҳиш медиҳад.

Дар расми 4.3 қачхаттаҳои потенциодинамикӣ оварда шудаанд, ки рафтори анодии хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3-ро, ки дар таркибаш қалбағӣ доранд, тавсиф мекунанд. Барои хӯлаҳои бо қалбағӣ чавҳаронидашуда дар муқоиса бо хӯлаи аслии АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3, дар хатҳои потенциодинамикӣ минтақаи ҳолати фаъол ва ғайрифавол ба қиматҳои потенциали мусбат ва бо афзоиши консентратсияи элементи лигарӣ коҳиш ёфта, зичии чараёни зангзанӣ мушоҳида карда мешавад. Ин дар навбати худ, потенциали питингро ба самити мусби мекуҷонад.

**Ҷадвали 4.2** – Хусусиятҳои зангзанию электрохимиявӣи хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3, ки бо қалъагӣ чавҳаронидашуда, дар муҳити электролити NaCl:

Муҳити NaCl, %-и масса	Микдори қалъагӣ дар хӯла %-и мас.	Потенсиали электрохимиявӣ, В (х.с.э.)				Суръати зангзани	
		-E <sub>св.кор.</sub>	-E <sub>кор.</sub>	-E <sub>п.о.</sub>	-E <sub>реп.</sub>	i <sub>кор.</sub> , А/м <sup>2</sup>	K·10 <sup>3</sup> , г/м <sup>2</sup> ·ч
0,03	0.00	0,894	1,056	0,642	0,800	0,28	9,38
	0.01 Sn	0,884	1,044	0,630	0,788	0,24	8,04
	0.05 Sn	0,876	1,031	0,617	0,780	0,22	7,37
	0.1 Sn	0,868	1,018	0,601	0,770	0,20	6,70
	0.5 Sn	0,862	1,004	0,588	0,770	0,18	6,30
0,3	-	0,917	1,100	0,694	0,838	0,39	13,65
	0.01 Sn	0,906	1,087	0,676	0,830	0,37	12,39
	0.05 Sn	0,897	1,072	0,660	0,822	0,35	11,72
	0.1 Sn	0,890	1,056	0,644	0,820	0,33	11,05
	0.5 Sn	0,882	1,040	0,630	0,811	0,31	10,38
3,0	-	0,936	1,140	0,720	0,870	0,52	17,42
	0.01 Sn	0,923	1,128	0,706	0,861	0,50	16,75
	0.05 Sn	0,914	1,116	0,690	0,849	0,48	16,08
	0.1 Sn	0,906	1,104	0,677	0,840	0,46	15,41
	0.5 Sn	0,897	1,092	0,660	0,832	0,44	14,74



**Расми 4.3** – Қаҷхаттаҳои поляризацияи анодии потенциодинамикӣ (2 мВ/с) ҳулаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 (1), бо қалъагӣ

чавҳаронидашуда ба % - и масса: 0,01(2), 0,05(3), 0,1(4), 0,5 (5), дар муҳити электролити NaCl 0,03 (а), 0,3 (б) ва 3,0% (в) [57-58].

### **4.3 Таъсири сурб ба рафтори анодии хӯлаи алюминийи**

#### **АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3**

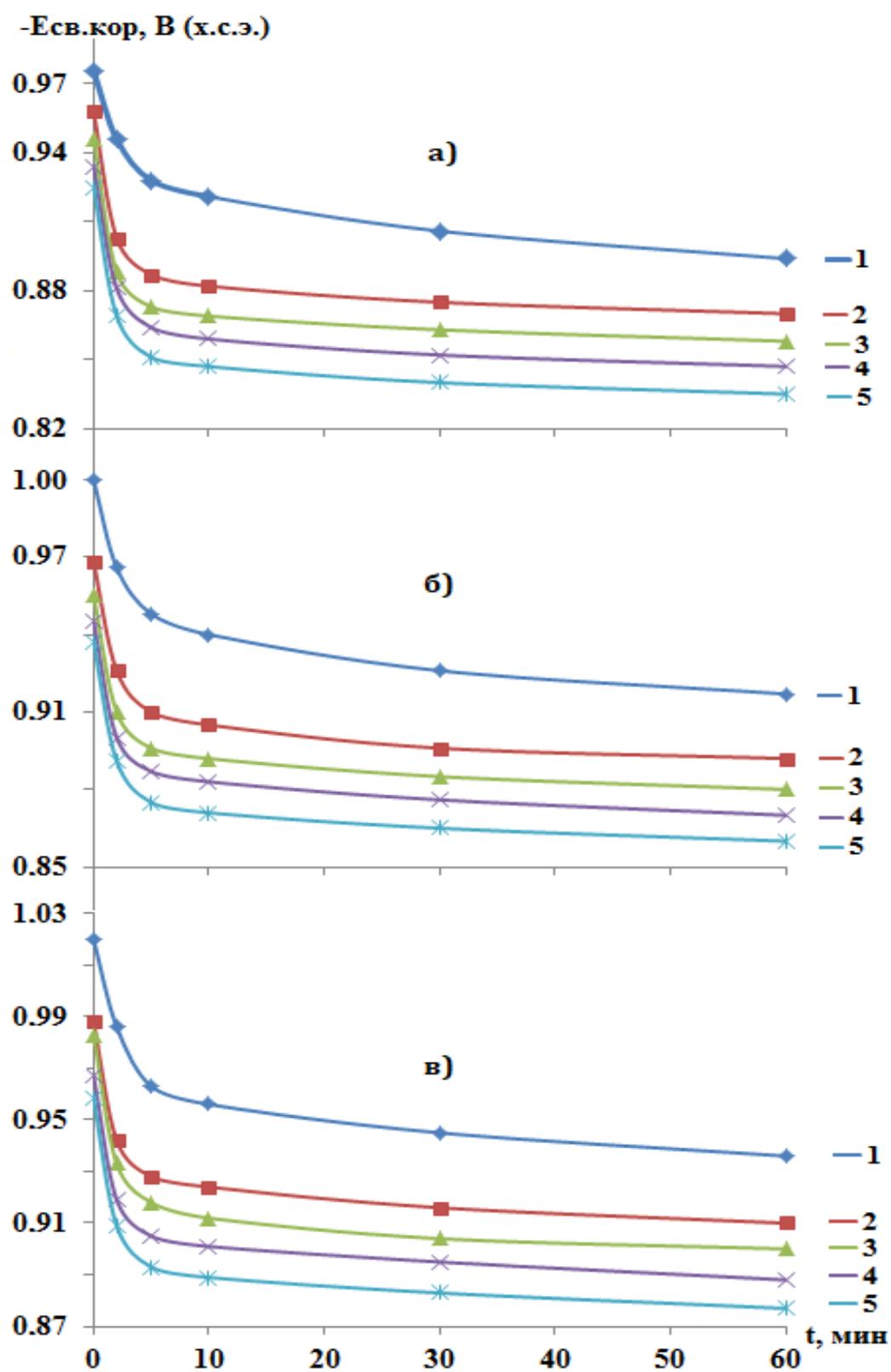
Барои беҳтар намудани сохтор ва хосиятҳои хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3, ба сифати элементи чавҳарӣ сурбро интихоб намудем.

Хусусиятҳои асосии анодии хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3, бо иловаи сурб, ки хусусият ва тағйирёбии нишондиҳандаҳои асосии зангзаниро ифода менамоянд, дар ҷадвали 4.3, 4.4 ва расмҳои 4.4, 4.5 нишон дода шудаанд. Дар ҷадвали 4.3 вобастагии потенциали озоди зангзании хӯлаи аслии АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 ва хӯлаҳои бо миқдори гуногуни сурб чавҳаронидашуда вобаста аз вақт, дар маҳлули электролити 0,03, 0,3 ва 3% -и NaCl омехташуда нишон дода шудааст. Чӣ тавре, ки айён аст, ҳам барои хӯлаи ибтидоӣ ва ҳам барои хӯлаҳои бо сурб чавҳаронидашуда, сарфи назар аз таркиби электролитҳо ва вақт, бо тағйирёбии якбораи потенциали озоди зангзанӣ дар минтақаи мусбат ҷойгир аст.

Дар ҷадвали 4.4 натиҷаҳои тадқиқоти зангзанӣ ва хусусиятҳои электрохимиявии хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо сурб чавҳаронидашуда бо суръати тобиши 2 мВ/с бо поляризацияи катодӣ тибқи усули муқараршуда [57-58] оварда шудаанд. Бо зиёдшудани миқдори элементҳои чавҳарӣ, потенциалҳои зангзанӣ, ташаккули питинг ва репассиватсия ба самти мусбӣ ҷойиваз мешаванд. Суръати зангзанӣ, ки аз шохаҳои катодии қачхатаҳои потенциодинамикӣ ҳисоб шудааст, нишон медиҳад, ки иловаи сурб дар миқдорӣ 0,05 то 0,5 %-и масса, суръати зангзании хӯлаи аслии АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3-ро каме паст мекунад.

**Чадвали 4.3** – Потенсиали (х.с.э.) озод зангзанй (-Есв.кор., В) вобаста аз вақт барои хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 ва аз таркиби сурб, дар муҳити электролитии NaCl:

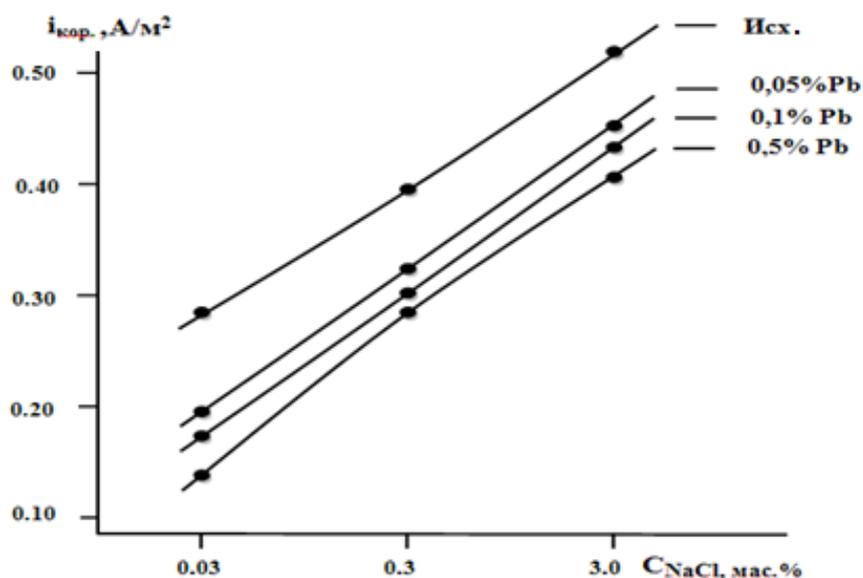
Муҳити электролит NaCl	Вақти нигоҳдорӣ, дақиқа	Миқдори сурб дар таркиби хӯла, % - и масса				
		0.0	0.01	0.05	0.1	0.5
0,03	0	0,976	0,958	0,946	0,934	0,925
	0,6	0,953	0,910	0,895	0,888	0,876
	2	0,946	0,903	0,888	0,881	0,869
	4	0,933	0,892	0,878	0,869	0,856
	5	0,928	0,887	0,873	0,864	0,851
	10	0,921	0,882	0,869	0,859	0,847
	20	0,913	0,878	0,866	0,855	0,843
	30	0,906	0,875	0,863	0,852	0,840
	40	0,896	0,872	0,860	0,849	0,838
	50	0,895	0,870	0,859	0,847	0,836
	60	0,894	0,870	0,858	0,847	0,835
0,3	0	1,000	0,968	0,955	0,945	0,937
	0,6	0,974	0,932	0,915	0,906	0,897
	2	0,966	0,926	0,910	0,900	0,891
	4	0,954	0,915	0,900	0,891	0,880
	5	0,948	0,910	0,896	0,887	0,875
	10	0,940	0,905	0,892	0,883	0,871
	20	0,932	0,900	0,888	0,879	0,868
	30	0,926	0,896	0,885	0,876	0,865
	40	0,923	0,894	0,883	0,873	0,863
	50	0,919	0,892	0,881	0,870	0,861
	60	0,917	0,892	0,880	0,870	0,860
3,0	0	1,020	0,988	0,983	0,967	0,958
	0,6	0,994	0,948	0,939	0,925	0,915
	2	0,986	0,942	0,933	0,919	0,909
	4	0,970	0,933	0,922	0,909	0,898
	5	0,963	0,928	0,918	0,905	0,893
	10	0,956	0,924	0,912	0,901	0,889
	20	0,950	0,920	0,907	0,898	0,886
	30	0,945	0,916	0,904	0,895	0,883
	40	0,940	0,913	0,902	0,892	0,879
	50	0,936	0,911	0,900	0,890	0,877
	60	0,936	0,910	0,900	0,888	0,877



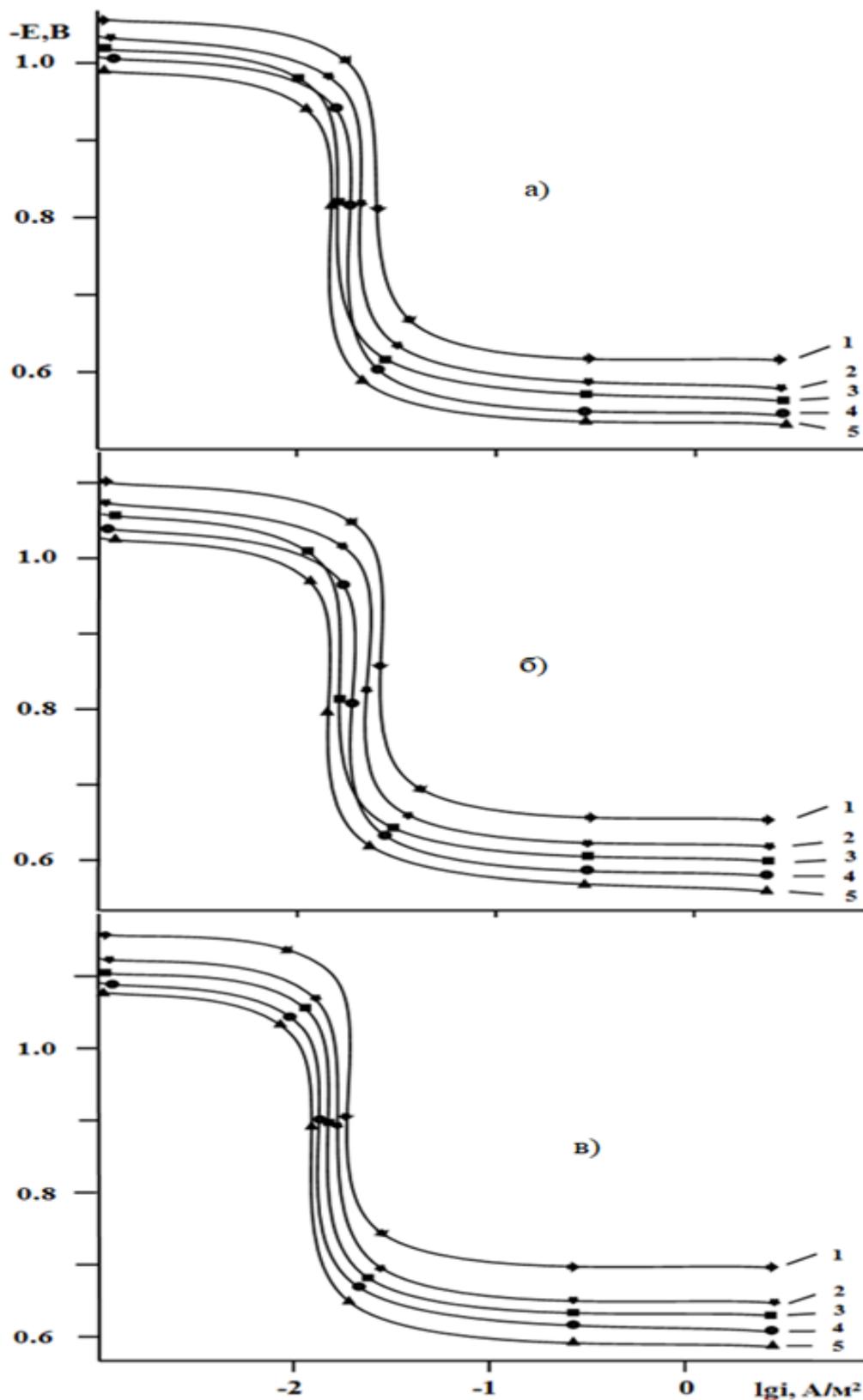
**Расми 4.4** – Вобастагии потенциали озоди зангзании аз вақт барои хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 (1) бо таркиби сурб, % - и масса: 0,01 (2), 0,05 (3), 0,1 (4), 0,5 (5), дар муҳити электролитӣ 0,03 (а), 0,3 (б) ва 3 (с) % - и NaCl.

**Ҷадвали 4.4** — Таъсири сурб ба хусусиятҳои электрохимиявии хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3, дар муҳити электролитии NaCl:

Муҳити NaCl, %-масса	Миқдори сурб дар таркиби хӯла %-и масса	Потенциали электрохимиявии, В (х.с.э.)				Суръати зангзани	
		$-E_{св.кор}$	$-E_{кор}$	$-E_{п.о}$	$-E_{реп.}$	$i_{кор}, A/m^2$	$K \cdot 10^3, \Gamma/m^2 \cdot ч$
0,03	0.00	0,894	1,056	0,642	0,800	0,28	9,38
	0.01	0,870	1,032	0,619	0,777	0,22	7,37
	0.05	0,858	1,020	0,604	0,769	0,19	6,36
	0.1	0,847	1,007	0,592	0,762	0,17	5,69
	0.5	0,835	0,993	0,575	0,755	0,14	4,69
0,3	0.00	0,917	1,100	0,694	0,838	0,39	13,65
	0.01	0,892	1,076	0,664	0,821	0,34	11,39
	0.05	0,880	1,060	0,648	0,810	0,32	10,72
	0.1	0,870	1,041	0,632	0,803	0,30	10,05
	0.5	0,860	1,028	0,617	0,800	0,28	9,38
3,0	0.00	0,936	1,140	0,720	0,870	0,52	17,42
	0.01	0,910	1,120	0,697	0,852	0,47	15,74
	0.05	0,900	1,105	0,682	0,841	0,45	15,07
	0.1	0,888	1,091	0,664	0,834	0,43	14,40
	0.5	0,877	1,080	0,648	0,825	0,41	13,73



**Расми 4.5** – Зичии ҷараёни зангзании хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо сурб ҷавҳаронидашуда, бо %-и масса: 0,05; 0,1; 0,5 вобаста аз консентратсияи NaCl.



**Расми 4.6** – Қаҷхатҳои потенциодинамикии поляризацияи анодии (2 мВ/с) ҳӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 (1), ки дар таркибаш сурб, ба % - масса: 0,01(2), 0,05(3), 0,1(4), 0,5 (5), дар муҳити электролити NaCl 0,03 (а), 0,3 (б) ва 3,0% (в).

#### 4.4. Таъсири висмут ба рафтори анодии хӯлаи алюминийи

##### АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3

Таъсири висмут ва иони Cl ба рафтори зангзанию электрохимиявии хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 дар муҳити электролитии NaCl бо консентратсияи 3,0, 0,3, ва 0,03 %-и масса омӯхта шуданд.

Натиҷаҳое, ки ҳангоми омӯзиши рафтори анодии хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо миқдори гуногуни висмут ҷавҳаронидашудаанд ва ба даст омадаанд, дар расмҳои 4.7, 4.8 ва дар ҷадвалиҳои 4.5, 4.6 дарҷ гардиданд.

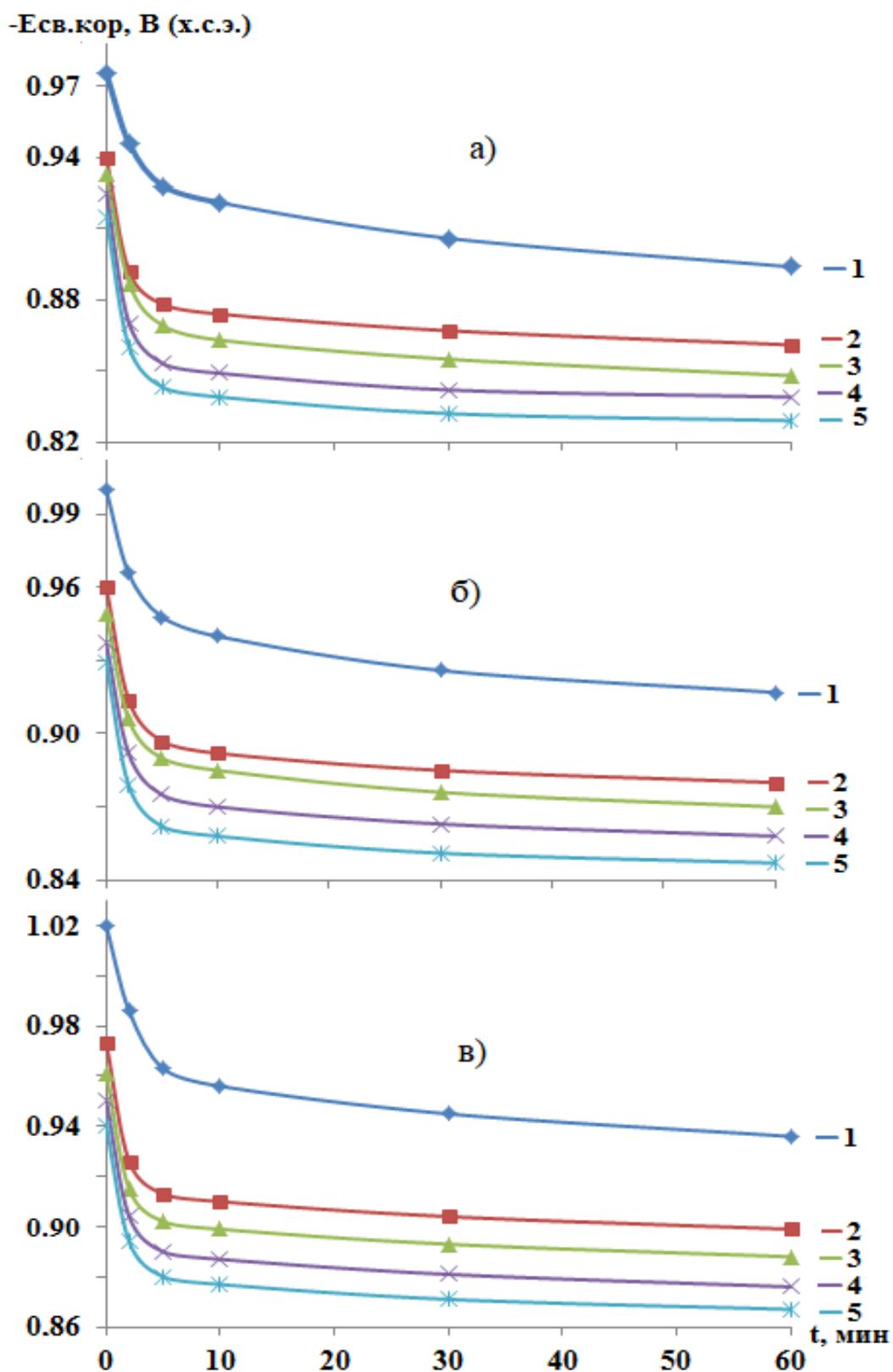
Ҳангоми омӯзиши рафтори зангзанӣ-электрохимии хӯлаҳои мазкур вобастагии потенциали озоди зангзанӣ дар мудати 60 дақиқаи нигоҳдорӣ дар электролит тадқиқ карда шуд ва аз натиҷаҳои он маълум гардид, ки хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо висмут ҷавҳаронидашуда потенциали электродро ба самти мусбат мукӯҷонад (Ҷадвали 4.5 ва расми 4.7).

Ҳангоми фарқ кардани намунаҳо ба муҳити электролитии 0,03, 0,3 ва 3% NaCl потенциали озоди зангзанӣ зиёд мешавад. Нигоҳдории минбаъдаи намуна дар муддати як соат дар муҳити электролитӣ потенциали статсионарро ба вучуд меорад, ки бо ҳосилкунии плёнқаҳои муҳофизатӣ дар рӯи намунаҳо алоқаманд аст.

**Ҷадвали 4.5** – Вобастагии потенциали озоди зангзании (- Есв.кор., В) аз вақт барои хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 аз миқдори висмут дар таркиби хӯла, дар муҳити электролитии NaCl:

Муҳит NaCl, %-и масса	Вақти нигоҳдорӣ, дақиқа	Миқдори висмут дар таркиби хӯла, %-и масса				
		0.0	0.01	0.05	0.1	0.5
0,03	0	1,020	0,973	0,961	0,950	0,940
	0,2	1,010	0,957	0,944	0,932	0,924
	0,4	1,003	0,943	0,931	0,919	0,912
	0,6	0,994	0,931	0,920	0,909	0,900
	2	0,986	0,926	0,915	0,904	0,894
	4	0,970	0,917	0,906	0,894	0,884
	5	0,963	0,913	0,902	0,890	0,880
	10	0,956	0,910	0,899	0,887	0,877

	20	0,950	0,907	0,896	0,884	0,874
	30	0,945	0,904	0,893	0,881	0,871
	40	0,940	0,902	0,890	0,879	0,869
	50	0,936	0,900	0,889	0,877	0,867
	60	0,936	0,899	0,888	0,876	0,867
0,3	0	1,000	0,960	0,949	0,937	0,929
	0,2	0,990	0,946	0,936	0,922	0,914
	0,4	0,983	0,933	0,924	0,908	0,900
	0,6	0,974	0,920	0,912	0,898	0,886
	2	0,966	0,914	0,906	0,892	0,879
	4	0,954	0,902	0,995	0,880	0,867
	5	0,948	0,897	0,890	0,875	0,862
	10	0,940	0,892	0,885	0,870	0,858
	20	0,932	0,888	0,880	0,866	0,854
	30	0,926	0,885	0,876	0,863	0,851
	40	0,923	0,882	0,873	0,860	0,849
	50	0,919	0,880	0,871	0,859	0,847
	60	0,917	0,880	0,870	0,858	0,847
3,0	0	1,020	0,973	0,961	0,950	0,940
	0,2	1,010	0,957	0,944	0,932	0,924
	0,4	1,003	0,943	0,931	0,919	0,912
	0,6	0,994	0,931	0,920	0,909	0,900
	2	0,986	0,926	0,915	0,904	0,894
	4	0,970	0,917	0,906	0,894	0,884
	5	0,963	0,913	0,902	0,890	0,880
	10	0,956	0,910	0,899	0,887	0,877
	20	0,950	0,907	0,896	0,884	0,874
	30	0,945	0,904	0,893	0,881	0,871
	40	0,940	0,902	0,890	0,879	0,869
	50	0,936	0,900	0,889	0,877	0,867
	60	0,936	0,899	0,888	0,876	0,867



Расми 4.7 – Вобастагии потенциали озоди зангзании хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 аз вақт (1) ва миқдори висмут, %-масса: 0,01 (2), 0,05 (3), 0,1 (4), 0,5 (5), дар муҳити электролитӣ 0,03 а), 0,3 б) ва 3 в) - NaCl.

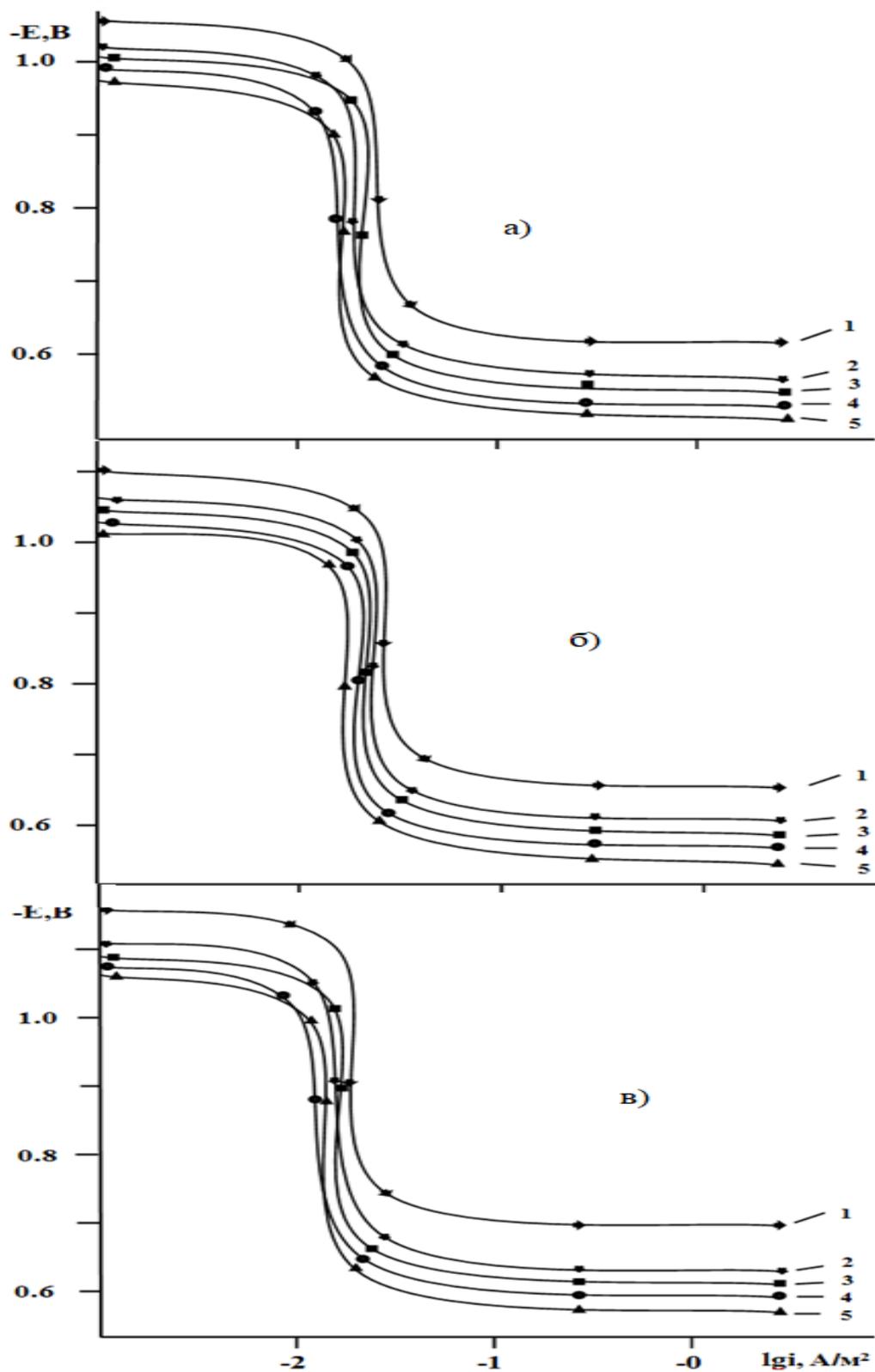
**Чадвали 4.6** – Хусусиятҳои зангзанӣ-электрохимии хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3, ки бо висмут чавҳаронидашуда, дар муҳити электролитии NaCl:

Муҳити NaCl, % - масса	Миқдори висмут дар таркиби хӯла, % -и масса	Потенциалҳои электрохимиявӣ, В (х.с.э.)				Суръати зангзанӣ	
		-E <sub>св.кор</sub>	-E <sub>кор</sub>	-E <sub>п.о</sub>	-E <sub>реп.</sub>	i <sub>кор.</sub> , А/м <sup>2</sup>	K·10 <sup>3</sup> , г/м <sup>2</sup> ·ч
0,03	0.00	0,894	1,056	0,642	0,800	0,28	9,38
	0.01	0,861	1,019	0,606	0,765	0,20	6,70
	0.05	0,848	1,008	0,593	0,757	0,17	5,69
	0.1	0,839	0,994	0,580	0,751	0,14	4,69
	0.5	0,829	0,982	0,564	0,744	0,11	3,68
0,3	0.00	0,917	1,100	0,694	0,838	0,39	13,65
	0.01	0,880	1,064	0,652	0,812	0,32	10,72
	0.05	0,870	1,049	0,637	0,800	0,29	9,71
	0.1	0,858	1,028	0,619	0,800	0,25	8,37
	0.5	0,847	1,014	0,603	0,792	0,23	7,70
3,0	0.00	0,936	1,140	0,720	0,870	0,52	17,42
	0.01	0,899	1,109	0,686	0,843	0,44	14,74
	0.05	0,888	1,093	0,670	0,832	0,41	13,73
	0.1	0,876	1,078	0,651	0,820	0,38	12,73
	0.5	0,867	1,066	0,634	0,820	0,36	12,06

Хусусиятҳои электрохимиявии хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3, бо висмут чавҳаронидашуда, ки бо суръати тобиши потенциали 2 мВ/с ба қайд гирифта шуда, дар чадвали 4.6 нишон дода шудааст. Муқаррар карда шуд, ки бо зиёдшавии миқдори висмут потенциали зангзанӣ, питтингҳосилкунӣ ва репассиватсияи хӯлаи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 зиёд мешаванд. Зиёдшавии миқдори висмут, боиси кам шудани зичии ҷараён ва суръати зангзании хӯлаи ибтидоӣ мегардад.

Аз шохаҳои катодии қачхатҳои потенциодинамикии суръати зангзании ҳисобкардашуда, дида мешавад, ки иловаҳои висмут, суръати зангзании хӯлаи ибтидоии алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3-ро аз 30 то 60 фоиз кам мекунад.

Дар расми 4.8 қачхатҳои потенциодинамикӣ нишон дода шудаанд, ки рафтори анодии хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3-и бо висмут чавҳаронидашгударо тавсиф мекунад. Дар хӯлаҳои чавҳаронидашуда, дар муқоиса бо хӯлаи аслии АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3, дар қачхатҳои потенциодинамикӣ, минтақаи ҳолати фаъол ва ғайрифавол ба самти потенциали мусбат майл менамояд ва бо зиёд шудани концентратсияи элементи чавҳарӣ коҳишёбии ҷараёни зангзанӣ ба мушоҳида мерасад. Ин дар навбати худ, бо ҷойивазкунии потенциали питтингҳосилкунӣ ба самти мусбат майл мекунад.

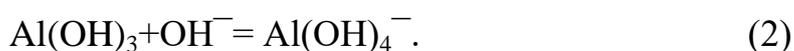
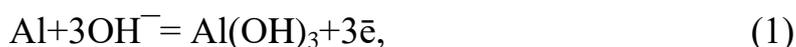


**Расми 4.8** – Қаҷхатҳои анодии потенциодинамикии поляризацсионии (2 мВ/с) хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 (1), бо висмут чавҳаронидашуда бо % - и масса: 0,01(2), 0,05(3), 0,1(4), 0,5( 5) дар муҳити электролити 0,03 (а), 0,3 (б) ва 3,0% (в) NaCl

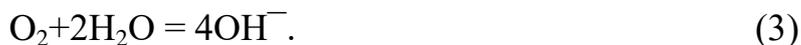
#### 4.5. Хулосаи боби 4

Чӣ тавре маълум аст, хатарноктарин намуди зангзании алюминий ва хӯлаҳои он зангзании питингӣ ба ҳисоб меравад, ки дар натиҷаи таъсири ионҳои хлориди муҳити атроф ба вучуд меояд. Аз ҳамин сабаб, интихоби маҳлули NaCl ҳамчун муҳити зангзананда дар тадқиқоти электрохимиявӣ ва зангзанӣ асоснок аст.

Ҳалшавии алюминий дар муҳити нейтралӣ тибқи раванди зерин ба амал меояд:



Марҳилаи маҳдудкунандаи раванди ҳалшавӣ аз рӯйи суръати интиқоли ионҳои  $\text{OH}^-$  ба сатҳи электрод муайян мегардад. Дар маҳлулҳои нейтралӣ дорои газ, оксиген ҳамчун деполяризатор амал мекунад. Дар сатҳи байни металл ва маҳлул раванди коҳишёбии оксиген тибқи реаксияи зерин сурат мегирад:



Суръати зангзанӣ аз чараёни паҳншавии оксигени ҳалшуда дар электролит ба сатҳи электрод вобаста аст, ки ин марҳила хусусияти маҳдудкунанда дорад. Дар натиҷаи таъсири  $\text{OH}^-$  бо металл, дар сатҳи он қабати оксиди гидратшуда бо формулаи умумии  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  ба вучуд меояд, ки ҳамчун маҳсулоти мобайнӣ ташаккул меёбад. Оксид ва гидроксиди алюминий дар муҳитҳои ишқорӣ ва туршӣ хуб ҳал мешаванд, вале дар маҳлулҳои нейтралӣ амалан ҳалшавандаанд. Маҳз ҳамин хусусият татбиқи амалии алюминий ва хӯлаҳои онро дар муҳитҳои моеи наздик ба нейтралӣ асоснок менамояд. Плёнкаҳои оксиди алюминий дар чунин муҳитҳо хосияти баланди муҳофизатӣ нишон дода, зангзании якхела одатан, ночиз аст ва бештар дар нуқсонҳои маҳалии қабати оксид рух медиҳад [70, 71].

Натиҷаҳои тадқиқи хосиятҳои зангзанӣ-электрохимии хӯлаҳои алюминийи системаҳои АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо Pb (Sn, Bi) чавҳаронидашуда, ки дар қадвалҳои 4.7–4.12 оварда шудаанд, нишон медиҳанд,

ки иловаҳои қалъагӣ, сурб ва висмут аз 0,01 то 0,5 - % масса ба хӯлаи ибтидоии алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 дар се муҳити омӯхташуда потенциалҳои зангзанӣ, репассиватсия ва питингҳосилкуниро ба диапазони қиматҳои мусбати интиқол медиҳанд ва ҳамзамон муқовимат ба зангзании хӯлаи ибтидоии алюминий АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 – ро зиёд мекунанд.

Вобастагии суръати зангзании хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 аз миқдори қалъагӣ, сурб ва висмут дар таркиби хӯла дар муҳити электролити 0,03, 0,3 ва 3% NaCl дар ҷадвалҳои 4.7 – 4.9 нишон дода шудааст.

**Ҷадвали 4.7** - Суръати зангзании хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 вобаста аз миқдори қалъагӣ, сурб ва висмут дар таркиби хӯла, дар муҳити электролити 0,03% NaCl:

Элементи лигари хӯла	Миқдори элементҳои лигарӣ дар таркиби хӯла, % - и масса.					
	0.0		0.1		0.5	
	Суръати зангзанӣ					
	$i_{корр.},$ А/м <sup>2</sup>	$K \cdot 10^3,$ г/м <sup>2</sup> ·ч	$i_{корр.},$ А/м <sup>2</sup>	$K \cdot 10^3,$ г/м <sup>2</sup> ·ч	$i_{корр.},$ А/м <sup>2</sup>	$K \cdot 10^3,$ г/м <sup>2</sup> ·ч
Қалъаги	0,28	9,38	0,20	6,70	0,18	6,30
Сурб			0,17	5,69	0,14	4,69
Висмут			0,14	4,69	0,11	3,68

**Ҷадвали 4.8** - Вобастагии суръати зангзании хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 аз таркиби қалъагӣ, сурб ва висмут, дар муҳити электролити 0,3% NaCl:

Элементи лигарӣ	Миқдори элементҳои лигарӣ дар хӯла, % - масса					
	0.0		0.1		0.5	
	Суръати зангзанӣ					
	$i_{корр.},$ А/м <sup>2</sup>	$K \cdot 10^3,$ г/м <sup>2</sup> ·ч	$i_{корр.},$ А/м <sup>2</sup>	$K \cdot 10^3,$ г/м <sup>2</sup> ·ч	$i_{корр.},$ А/м <sup>2</sup>	$K \cdot 10^3,$ г/м <sup>2</sup> ·ч
Қалъагӣ	0,39	13,65	0,33	11,05	0,31	10,38
Сурб			0,30	10,05	0,28	9,38
Висмут			0,25	8,37	0,23	7,70

Зичии чараёни зангзании хӯлаи аслии алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 дар муҳити 0,03, 0,3 ва 3% NaCl мувофиқан ба 0,28; 0,39 ва 0,52 А/м<sup>2</sup> ва барои хӯла бо иловаи 0,5 % - масса қалъагӣ дар муҳити электролитии 0,03, 0,3 ва 3% NaCl ин мувофиқан ба 0,18; 0,31 ва 0,44 А/м<sup>2</sup>, баробар аст (Қадвалҳои 4.7 – 4.9). Ин натиҷаҳо нишон медиҳанд, ки дар баробари зиёд шудани консентратсияи хлориди натрий, яъне бо зиёд шудани ҳиссаи ионҳои хлор баланд шудани суръати зангзании хӯлаҳои мазкур мушоҳида мешавад.

**Қадвали 4.9** - Вобастагии суръати зангзании хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 аз таркиби қалъагӣ, сурб ва висмут, дар муҳити электролитии 3% NaCl:

Элементи лигарӣ	Миқдори элементи лигарӣ дар хӯла, % - масса					
	0.0		0.1		0.5	
	Суръати зангзанӣ					
	$i_{корр.},$ А/м <sup>2</sup>	$K \cdot 10^3,$ г/м <sup>2</sup> ·ч	$i_{корр.},$ А/м <sup>2</sup>	$K \cdot 10^3,$ г/м <sup>2</sup> ·ч	$i_{корр.},$ А/м <sup>2</sup>	$K \cdot 10^3,$ г/м <sup>2</sup> ·ч
Қалъагӣ	0,52	17,42	0,46	15,41	0,44	14,74
Сурб			0,43	14,40	0,41	13,73
Висмут			0,38	12,73	0,36	12,06

Ҳамин тавр, ба ҳулосае омадан мумкин аст, ки ҳангоми илова намудан қалъагӣ сурб ва висмут дар доираи 0,1÷0,5% ба хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 таъсири назаррас дида мешавад. Аз ин рӯ, хӯлаи мазкур бо таркибҳои омӯхташуда ба зангзании анодӣ бештар тобовар аст.

Дар хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо қалъагӣ, сурб ва висмут ҷавҳаронидашуда муқовимати питтинг бо зиёд шудани миқдори элементи лигарӣ зиёд мешавад, ки ин аз гузаштан ба минтақаи мусбати потенциали питтингҳосилкунӣ ва зангзании озоди хӯлаҳоро нишон медиҳад.

Хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3, ки дар таркибаш аз 0,1 то 0,5% қалъагӣ, сурб ва висмут дорад, ба зангзанӣ муқовимати зиёд дорад, ки онро натиҷаи таъсири элементҳои лигарӣ ва қобилияти ба вучуд овардани пардаи оксидии муҳофизатӣ, тобовар ба ионҳои хлор фарқкунанда ва набудан камбудихо шарҳ додан мумкин аст. (ҷадвали 4.10 ва 4.11).

**Ҷадвали 4.10** – Вобастагии потенциали зангзании озод ( $(-E_{\text{св.кор.}}, В)$ ) аз миқдорӣ электролитҳои NaCl барои хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3, ки бо қалъагӣ, сурб ва висмут ҷавҳаронида шудааст:

Элементи лигарӣ	Миқдори элементи лигарӣ дар хӯла, % - масса								
	0.0			0.1			0.5		
	Муҳити NaCl, % - масса								
	0.03 %	0.3%	3.0%	0.03%	0.3%	3.0%	0.03 %	0.30%	3,0%
Қалъагӣ	0,894	0,917	0,936	0,868	0,890	0,906	0,862	0,882	0,897
Сурб	0,894	0,917	0,936	0,847	0,870	0,888	0,835	0,860	0,877
Висмут	0,894	0,917	0,936	0,839	0,858	0,876	0,829	0,847	0,867

**Ҷадвали 4.11** - Тағйирёбии потенциали питтингҳосилкунӣ ( $(-E_{\text{п.о.}}, В)$ ) хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3, ки бо қалъагӣ, сурб ва висмут ҷавҳаронида шудааст, дар муҳити электролитии NaCl:

Элементи лигарӣ	Миқдори элементи лигарӣ дар хӯла, % - масса								
	0.0			0.1			0.5		
	Муҳити NaCl, % - масса								
	0,03%	0,3%	3,0%	0,03%	0,3%	3,0%	0,03%	0,3%	3,0%
Қалъагӣ	0,642	0,694	0,720	0,601	0,644	0,677	0,588	0,630	0,660
Сурб	0,642	0,694	0,720	0,592	0,632	0,664	0,575	0,617	0,648
Висмут	0,642	0,694	0,720	0,580	0,619	0,651	0,564	0,603	0,634

Вобастагии суръати зангзании хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 аз миқдорӣ қалъагӣ, сурб ва висмут дар таркиби хӯла

дар муҳити электролитии 0,03, 0,3 ва 3% NaCl дар чадвали 4.12 оварда шудааст. Натиҷаҳои бадастомада нишон медиҳанд, ки дар ҳӯлаи ибтидоӣ ҳангоми аз 0,1 то 0,5 % - масса зиёд шудани миқдори элементҳои лигари дар боло зикршуда, коҳиши якхелаи суръати зангзанӣ ба амал меояд (Чадвали 4.12). Дар байни элементҳои лигарӣ истифодашуда самаранокии висмут бештар аст, чунки висмут суръати зангзании ҳӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3-ро хеле кам мекунад.

**Чадвали 4.12** - Вобастагии суръати зангзании ( $K \cdot 10^{-3}$ , г/м<sup>2</sup>·ч) ҳӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 аз миқдори қалъагӣ, сурб ва висмут дар муҳити электролитии NaCl:

Элементи лигарӣ	Миқдори элементҳои лигарӣ дар ҳӯла, % - масса								
	0.0			0.1			0.5		
	Муҳити NaCl, % - масса								
	0,03%	0,3%	3,0%	0,03%	0,3%	3,0%	0,03%	0,3%	3,0%
Қалъагӣ	9,38	13,65	17,42	6,70	11,05	15,41	6,30	10,38	14,74
Сурб	9,38	13,65	17,42	5,69	10,05	14,40	4,69	9,38	13,73
Висмут	9,38	13,65	17,42	4,69	8,37	12,73	3,68	7,70	12,06

Хусусиятҳои зангзани ва электрохимиявии ҳӯлаҳои системаи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 – Pb (Sn, Bi) муқоиса намуда, метавон қайд кард, ки таркиби оптималии элементҳои лигарӣ дар таркиби ҳӯла ба 0.1÷0.5 % - масса баробар мебошад. Аз байни системаҳои омӯхташуда, суръати зангзании пастаринро ҳӯлаҳои системаи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо висмут ҷавҳаронидашуда, доранд.

Ҳамин тавр, ҳӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо қалъагӣ, сурб ва висмут имкон медиҳад, ки онҳо ҳамчун ҳӯлаи ба зангзанӣ тобовар тавсия карда шаванд (суръати зангзании он нисбат ба ҳӯлаи аввала 1,5 маротиба камтар аст).

## ХУЛОСАҲО

1. Дар речаи «хунукшавӣ» вобастагии ҳарорати гармиғунҷоиш, коэффитсиенти гармиғузaronӣ ва тағйироти функсияҳои термодинамикии хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3, ки бо қалъагӣ, сурб ва висмут ҷавҳаронида шудаанд, тадқиқ карда шуданд. Бо баробари баланд шудани ҳарорат, зиёд шудани гармиғунҷоиш ва коэффитсиенти гармиғузaronии хӯлаҳо нишон дода шудаст. Вобаста ба миқдори компоненти лигарӣ бузургии гармиғунҷоиш коҳиш ёфта, коэффитсиенти гармиғузaronӣ зиёд мешавад. Дар натиҷа полиномияҳои ба даст оварда шудаанд, ки вобастагии ҳароратро аз гармиғунҷоиши хӯлаҳо тавсиф мекунанд.

2. Тадқиқоти вобастагии ҳарорат аз тағйирёбии функсияҳои термодинамикии хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3, бо қалъагӣ, сурб ва висмут ҷавҳаронидашуда нишон медиҳад, ки ҳангоми зиёд шудани ҳарорат бузургии энталпия ва энтропияи хӯлаҳо афзуда, энергияи Гиббс коҳиш меёбад. Вобаста ба миқдори қалъагӣ, сурб ва висмут дар таркиби хӯлаи мазкур бузургии энталпия ва энтропияи хӯлаҳо коҳиш ёфта, бузургии энергия Гипс меафзояд, ки ин тағйирёбӣ, баландшавии дараҷаи гетерогении микросохтори хӯлаҳоро нишон медиҳад.

3. Бо усули термогравиметрӣ кинетикаи оксидшавии хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3, бо қалъагӣ, сурб ва висмут ҷавҳаронидашуда дар муҳити оксигенӣ ва дар ҳарорати 623, 673, ва 723К дар ҳолати сахтӣ омӯхта шуд. Муайян гардид, ки раванди оксидшавии хӯлаҳо ба қонуни гиперболи итоат мекунад ва суръати миёнаи он тақрибан  $10^{-4}$  кг·м<sup>-2</sup>·сек<sup>-1</sup> мебошад. Дар асоси тадқиқоти анҷомёфта, қонуниятҳои асосии тағйирёбии хусусиятҳои кинетикӣ ва энергетикӣ раванди оксидшавии хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 муқаррар карда шудаанд.

4. Омӯзиши таъсири қалъагӣ, сурб ва висмут ба кинетикаи оксидшавии хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 нишон дод, ки дар баробари зиёд шудани миқдорӣ компоненти лигарӣ дар таркиби хӯла ва ҳарорат, суръати

оксидшавии хӯлаҳо зиёд мешавад. Бузургии афзоиши вазни плёнкаи оксидии хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 бо қалъагӣ, сурб ва висмут ҷавҳаронидашуда амалан бетағйир боқи мемонанд ва энергияи фаъоли оксидшавии хӯлаҳо бо зиёд шудани миқдори элементи лигарӣ меафзояд.

5. Бо усули спектроскопияи инфрасурх (ИК) маҳсулоти оксидшавии хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3, ки бо қалъагӣ сурб ва висмут ҷавҳаронида шудааст, тадқиқ гардид. Муайян карда шуд, ки маҳсулоти оксидшавӣ асосан аз оксидҳои  $\text{Cu}_2\text{O}$ ;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ;  $\text{SiO}_2$ ;  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ ;  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ;  $\text{Si}_2\text{O}_7$ ;  $\text{Si}_3\text{O}_{10}$ ;  $\text{Si}_2\text{O}_7$ ;  $\text{Si}_2\text{O}_7$ ;  $\text{Si}_2\text{O}_7$ ;  $\text{Si}_2\text{O}_7$  иборат мебошанд. Дар ин ҳолат марҳилаи бартаридошта дар маҳсулоти оксидшавии хӯлаҳо оксиди алюминий мебошад.

6. Бо истифода аз усули потенциостатикӣ дар речаи потенциодинамикӣ бо суръати кушоишӣ потенциалии 2 мВ/с, рафтори анодии хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3, ки бо қалъагӣ, сурб ва висмут ҷавҳаронида шудааст, омӯхта шуд. Натиҷаҳо нишон доданд, ки илова кардани қалъагӣ, сурб ва висмут аз 0.01 до 0.5 % - масса, муқовимати хӯлаи алюминийи АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3-ро ба зангзанӣ дар муҳити электролитии NaCl то 30% зиёд менамояд.

7. Дар асоси тадқиқоти анҷомёфта патенти хурди Ҷумҳурии Тоҷикистон № ТҶ1179 «Хӯла дар асоси алюминий» таҳия ва ҳифз карда шуд.

## АДАБИЁТ

- [1]. Квасов Ф.И., Фридляндер И.Н. Алюминиевые сплавы типа дуралюмин. М.: Металлургия. 1984. 240 с.
- [2]. Фридляндер И.Н. Алюминиевые деформируемые конструкционные сплавы. М.: Металлургия. 1979. 208 с.
- [3]. Е. И. Кутайцева. Алюминиевые сплавы в машиностроении. — М.: Машиностроение, 1983. — 256 с.
- [4]. Петров, Д. А. Вопросы теории сплавов алюминия [Текст] / Проф. д-р Д. А. Петров. - Москва : Металлургиздат, 1951. - 256 с.,
- [5]. Ю.Г. Каблов Литейные алюминиевые сплавы. — М.: ВИАМ, 2017. — 480 с.
- [6]. О. А. Кайбышев. Современные алюминиевые сплавы и методы их обработки // Металлы. — 2016. — № 5. — С. 3–12.
- [7]. И.Н. Михайлов, М.Ю. Васильков, А.Е. Исаев, Д.З. Сафошкин, И.Д. Кособудский, Н.М. Ушаков Влияние концентрации кислотного электролита на геометрические параметры наноструктурированного пористого анодного оксида алюминия / Вестник СГТУ. 2021. № 2 (89).
- [8]. А. Е. Семёнов. Структура и свойства алюминиевых сплавов. — М.: Металлургия, 1985. — 220 с.
- [9]. В. Н. Баранников. Современные алюминиевые сплавы. — М.: Металлургия, 1988. — 248 с.
- [10]. G. W. Edington Practical Electron Microscopy in Materials Science. — London: Macmillan, 1976. — 192 p.
- [11]. J. W. Cahn, Hilliard J.E. Free energy of a nonuniform system // Journal of Chemical Physics. — 1958. — Vol. 28. — P. 258–267.
- [12]. Лев Федорович Мондольфо Structure and Properties of Aluminum Alloys. — London: Butterworths, 1976. — 971 p.
- [13]. J. E. Hatch (ed.) Aluminum: Properties and Physical Metallurgy. — Materials Park, OH: ASM International, 1984. — 424 p.

[14]. Ian J. Polmear Light Alloys: From Traditional Alloys to Nanocrystals. — 4th ed. — Oxford: Butterworth-Heinemann, 2006. — 421 p.

[15]. J. R. Davis (ed.) Aluminum and Aluminum Alloys. — Materials Park, OH: ASM International, 1993. — 784 p.

[16]. Polmear, I.J. (2004) Aluminium Alloys—A Century of Age Hardening. Materials Forum, 28.

[17]. D. J. Lloyd, “Particle Reinforced Aluminium and Magnesium Matrix Composites,” International Materials Reviews, Vol. 39, No. 1, 1994, pp.

[18]. R. Rainer Kampmann, Wagner R. Kinetics of precipitation in metastable binary alloys // Materials Science and Technology. — 1991. — Vol Scully J.R., Shoesmith D.W., Buchheit R.G. 7. — P. 101–108.

[19]. G. Kelly, Electrochemical Techniques in Corrosion Science and Engineering. — New York: Marcel Dekker, 2003. — 1144 p.

[20]. А. А. Ильин. Термическая обработка алюминиевых сплавов нового поколения // Металлы. — 2019. — № 4. — С. 45–52.

[21]. Раджабалиев, С.С. Физико-химические свойства сплава АЖ2,18 легированного оловом, свинцом и висмутом: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.16.09/ Раджабалиев Сафомудин Сайдалиевич. — Душанбе, 2018. — 146с.

[22]. Строганов, Г.Б. Сплавы алюминия с кремнием / Г.Б. Строганов, В.А.

Ротенберг, Г.Б. Гершман. — М.: Металлургия. 1977. — 272с.

[23]. Бочвар А.А. Металловедение. М.: Металлургиздат. 1956. 495 с.

[24]. Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Ткаченко Е.А., Вахромов Р.О. Алюминиевые деформируемые сплавы / В сб.: Авиационные материалы и технологии: Юбилейный науч.-технич. сб. (приложение к журналу «Авиационные материалы и технологии»). М.: ВИАМ. 2012. С. 167–182.

[25]. Чирков Е.Ф. Жаропрочный сплав М40. Алюминиевые сплавы. Промышленные деформируемые, спеченные и литейные сплавы. М.: Металлургия. 1972. С. 123-131.

[26]. Колобнев И.Ф. Жаропрочность литейных алюминиевых сплавов. М.: Металлургия. 1973. 320 с.

[27]. Phillips H.W.L. Annotated Equilibrium Diagrams of Some Aluminium Alloy Systems. The Inst. of Met. Monograph and Report Series. 1959. №25. 86 p.

[28]. Антипов В.В. Стратегия развития титановых, магниевых, бериллиевых и алюминиевых сплавов /В сб.: Авиационные материалы и технологии: Юбилейный науч. технич. сб. (приложение к журналу «Авиационные материалы и технологии»). М.: ВИАМ. 2012. С. 157-167.

[29]. Гинье А. Неоднородные металлические твердые растворы. М.: Иностран. лит. 1962. 187 с.

[30]. Wilson R.N., Moore D.M., Forsyth P.Y.E. //J. Inst. Met. 1967. №95. P. 177.

[31]. Westmacott K.A., Barnes R.N., Hull D., Smallman R.E. //Phis. Mag. 1961. №6. P. 929.

[32]. Бочвар О.С., Походаев К.С. Тройные системы. Металловедение алюминия и его сплавов. М.: Металлургия. 1971. С. 102-208.

[33]. Чирков Е.Ф. Закономерности изменения горячеломкости и жидкотекучести жаропрочных алюминиевых сплавов системы Al-Cu-Mg в зависимости от содержаний Cu, Mg и добавок переходных металлов /В сб.: Авиационные материалы и технологии. Вып. «Перспективные алюминиевые, магниевые и титановые сплавы для авиакосмической техники». М.: ВИАМ. 2002. С. 104-125.

[34]. Chirkov E.F. Laws of Fluidity Variation for Aluminium Alloys of Al-Cu-Mg System/In: Proc. ICAA-5. 1996. Part 1. P. 265.

[35]. Иванько А.А. Твердость: Справочник. Киев: Наукова думка. 1968. 125 с.

[36]. Чирков Е.Ф. Склонность некоторых алюминиевомедномагниевых сплавов к образованию горячих трещин //Сварочное производство. 1982. №5 С. 10-13.

[37]. Чирков Е.Ф. Закономерности изменения горячеломкости алюминиевых сплавов системы Al-Cu-Mg //Изв. АН СССР. Металлы. 1983. №3. С. 175-181.

[38]. Chirkov E.F. Mn, Ti, Fe Effect on Hot Shortness of Al-Cu-Mg System Alloy Located in Phase Region  $\alpha$ -S /In: Proc. ICAA-6. 1998. Part 1. P. 595-601.

[39]. Chirkov E.F., Dolzhanski Y.M. Transition Metal Small Additions Effect on Hot Shortness of High – Temperature Weldable Alloy 1151 (Al-Cu-Mg) /In: Proc. ICAA-7. 2000. Part 3. P. 1731-1737.

[40]. Chirkov E.F., Dolzhanski Y.M., Fridlyander I.N. Change of Fluidity of Aluminium Superalloy 1151 (Al-Cu-Mg) During its Alloying by Transition Metals /In: Proc. ICAA- 7. 2000. Part 1. P. 331-338.

[41]. Chirkov E.F. Fundaments of Developing Compositions for Weldable Wrought Aluminium Alloys with Enhanced Heat Resistance /In: Proc. ICAA-9. 2005. P. 692–699.

[42]. Chirkov E.F., Fridlyander I.N., Cherkassov V.V. Universal Structural Weldable Aluminium Alloy 1151 with Improved Corrosion Resistens for Operation at Elevated and Cryogenic Temperature /In: Proc. ICAA-6. 1998. V. 3. P. 2041.

[43]. Алексеев А.А., Бер Л.Б., Климович Л.Г., Коробов О.С. Высокотемпературное старение сплава Al-1,3 ат.% Cu-1,3 ат.% Mg. Стадия когерентных выделений //ФММ. 1982. Т. 53. №4. С. 772-779.

[44]. Алексеев А.А., Бер Л.Б. Диаграммы фазовых превращений при старение сплавов системы Al-Cu-Mg //ТЛС. 1991. № 1. С. 9-13.

[45]. Alekseev A.A., Ananov V.N., Ber L.B., Kaputkin E.Ya. The Structure of Strengthening Precipitates Forming in High-Temperature of Al-Cu-Mg Alloys //The Physics of Metals and Metallography. 1993. V. 75. №3. P. 279-285.

[46]. Лужникова, Л.П. Материалы в машиностроении. - Т. 1. Цветные металлы и сплавы. - М., 1967. - 287 с.

[47]. Фридляндер И.Н. Алюминиевые деформируемые конструкционные сплавы. М.: Metallurgy, 1979. 208 с.

[48]. Колачев Б.А., Ливанов В.А., Елагин В.И. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. М.: Metallurgy, 1981. 414 с.

[49]. De Brouckerel. - J. Inst. Met. 1945. №71. P.131.

[50]. Preston, G.D., Bricumshaw, L.L. - Phil. Mag. – 1935. -№20. –P.706.

[51]. Dobinski, S. - Phil. Mag. 1936. №21. P.686.

[52]. Wubetu G. A., Costello J. T., Kelly T. J. [et al.] Comparison of LIBS and Polarization Resolved LIBS Emission Spectra for Aluminium Alloy // Zurnal Prikladnoj Spektroskopii. – 2023. – Vol. 90, No. 1. – P. 114.

[53]. Sovetbayev R. A., Nugman Y., Shayakhmetov Y. Y., Kawalek A. Obtaining the necessary mechanical properties of blanks of parts made of aluminum alloy 7075 by physical modeling // Science and Technology of Kazakhstan. – 2024. – No. 1. – P. 73-83. – DOI 10.48081/BWSE1265.

[54]. Kulovits A. K., Wiezorek J. M. K., Webler B., Deshpande A. R. Electron microscopy of commercial purity Al-2024 (Al-Mg-Cu) after accumulative roll-bonding // TMS Annual Meeting : Aluminum Alloys: Fabrication, Characterization and Applications II - TMS 2009 Annual Meeting and Exhibition, 15–19 февраля 2009 года. – San Francisco, CA, 2009. – P. 63-68.

[55]. Zuo, Y. Phase equilibria and solidification of Al-rich Al-Mg-Cu alloys / Y. Zuo, 1998. – 1 p. – EDN FCSPLB.

[56]. Gouma P. I., Lloyd D. J., Mills M. J. Precipitation processes in Al-Mg-Cu alloys // Materials Science and Engineering: A. – 2001. – Vol. 319-321. – P. 439-442. – DOI 10.1016/S0921-5093(01)01049-8. – EDN KLGXTF.

[57]. Kovarik L., Gouma P. I., Kisielowski C. [et al.] Decomposition of an Al-Mg-Cu alloy - A high resolution transmission electron microscopy investigation //

Materials Science and Engineering: A. – 2004. – Vol. 387-389, No. 1-2 SPEC. ISS.. – P. 326-330. – DOI 10.1016/j.msea.2004.03.087.

[58].Столяр, И. А. Влияние термической обработки на структурно-фазовый состав и микротвердость фольг сплава 1191 системы Al-Mg-Cu / И. А. Столяр, В. Г. Шепелевич, И. И. Ташлыкова-Бушкевич // Современные проблемы физики : Сборник тезисов, Минск, 04–06 ноября 2020 года / Под редакцией И.С. Никончук М.С. Усачёнка. – Минск: Институт физики НАН Беларуси, 2020. – С. 84-85.

[59].Chen, S. L A thermodynamic description for the ternary Al-Mg-Cu system / S. L. Chen, Y. Zuo, H. Liang, Y. A. Chang // Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science. – 1997. – Vol. 28, No. 2. – P. 435-446. – DOI 10.1007/s11661-997-0144-0.

[60].Shi, X. High-temperature tribological behavior of the Al/Mg/Cu multilayered composite produced by the severe plastic deformation / X. Shi, X. Wang, J. Zhang, H. Du // Tribology International. – 2024. – Vol. 199. – P. 110037. – DOI 10.1016/j.triboint.2024.110037.

[61].Фридляндер, И. Н. Высокопрочный конструкционный Al - Cu - Li - Mg-сплав пониженной плотности, легированный серебром / И. Н. Фридляндер, О. Е. Грушко, В. Ф. Шамрай, Г. Г. Ключков // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2007. – № 6(624). – С. 3-7.

[62].Мирзоев, Ш. И. Механические, теплофизические свойства и термодинамические функции сплавов системы алюминий - празеодим / Ш. И. Мирзоев, Б. Б. Эшов, Ш. А. Ахмедов [и др.] // Вестник Технологического университета Таджикистана. – 2020. – № 2(41). – С. 28-34.

[63].Алаттар Абоелкхаир, Л. А. Формирование повышенных теплофизических свойств конструкционных сплавов системы Al-Cu: специальность 05.16.02 "Металлургия черных, цветных и редких металлов" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Алаттар Абоелкхаир Лоаи Абоелкхаир, 2022. – 110 с.

[64].Талуц, С. Г. Экспериментальное исследование теплофизических свойств переходных металлов и сплавов на основе железа при высоких температурах: Автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 01.04.14 / С. Г. Талуц; Урал. гос. ун-т им. А.М. Горького. - Екатеринбург: Изд-во Урал. горн.-геол. акад., 2001. - 38 с.

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

[66].Бочвар А.А. Исследование механизма и кинетики кристаллизации сплавов эвтектического типа / А.А. Бочвар.// Моск. ин-т цвет. металлов и золота.-М.-Л. 1935. –С. 81.1985. –143 с.

[67].Белов, М.В. Исследование процесса кристаллизации Al-Si сплавов и разработка легкоплавких фосфорсодержащих лигатур с целью повышения качества литых поршневых заготовок / Дисс. канд. техн. наук: 05.16.04. – М. 2007. –119 с.

[68].Красиков, А.В. Исследование процесса анодирования силумина в растворах щавелевой и серной кислот / А.В. Красиков, В.Н. Нараев, В.Л. Красиков // (Электронный ресурс) Режим доступа: [http: science. spb. Izvetiya – TI. 2012. –13. Article](http://science.spb.ru/izvetiya)

[69].Лепинских, Б.М. Окисление жидких металлов и сплавов / Б.М. Лепинских, А.А. Киташев, А.А. Белоусов. –М.: Наук. 1979. –С. 116.

[70].Диаграмма состояния систем на основе алюминия и магния.: Справ. изд./ Дриц М. Е., Бочвар Н.Р. и др.-М.: Наука, 1977.-228с.

[71].Белов Н.А., Золоторевский В.С., Евсеев Ю. В., Иванов В.А. Влияние лития на структуру и механические свойства силуминов// Технология легких сплавов, 1989, №7. С. 8-11.

[72].Белов Н.А., Курдюмова Т. А. Диаграмма состояния  $Al - Si - Fe - Be$  и возможности нейтрализации  $Fe$  –фаз в силуминах // Изв. АН СССР, Металлы, 1989, №2.-С. 210-215

[73].Belov N.A., Gusev A. Yu., Eskin D.G. Evaluation of Five-Component Phase Diagrams for the Analysis of Phase Composition in Al-Si alloys // *Z. Metallkunde*. 1998, V.89, № 9.-P. 618-622

[74].Зиновьев, В.Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах. – М.: Металлургия, 1989. – 385с.

[75].Зиновьев, В.Е. Температуропроводность и теплопроводность твердого и жидкого олова / В.Е.Зиновьев, А.А. Баскакова, И.Г. Коршунов, Л.Д. Загребин // *ИФЖ*.–1973. –Т.25. – С.490 – 494.

[76].Олейников, П.П. Теплопроводность чистого железа // *ТВТ* –1981. – Т19. –С.533 –542.

[77].Gurvich, L.V. Thermodynamic properties of Inorganic Substances / L.V. Gurvich, I.V. Veys, S.B. Alcock // Washington-Philadelphia. Hemisphere Publ. Corp. 1990. –V.2. –569 p.

[78].Глазов, В.М. Теплофизические свойства (теплоёмкость и термическое расширение) монокристаллического кремния / В.М. Глазов, А.С. Пашинкин // *ТВТ*. 2001. –Т39. –№3. –С. 443–449

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

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

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

[82]. White, G.K. Heat capacity of reference materials Cu and W / G.K. White,

G.K. Gollocott // J. Phys Chem Ref Data. 1984. –V.8. –P. 1147-1298.

[83]. Alexander, S. Critical behavior the electrical resistivity on magnetic systems / S. Alexander, J.S. Heltan, I. Balderg // Phys Rev. 1976. –V.130. –P. 304-315.

[84]. Таблицы физических величин Справочник / Под. ред. Кикоина И. К. –М: Атомиздат. 1976. –321 с.

[85]. Landolt Bornstern Numerical data and functional relational relationships in science and technology Metals, phonon states, electron states and Fermi surfaces. – Berlin Springer. 1983. –683 p.

[86]. Термодинамические свойства индивидуальных веществ. Справочник / Под ред. В.П. Глушкова. –М.: Наука, 1982. –559 с.

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

[88]. Амонзода, И.Т. Структурообразование и свойства алюминиевого сплава АЖ2.18 с элементами II-IV групп периодической таблицы: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.02.01/ Амонзода Илхом Темур. – Душанбе, 2019. – 289с.

[89]. Карлов, А.В. Окисление жидких сплавов системы висмут–олово–свинец / А.В. Карлов, Н.В. Белоусова, Е.В. Карлов и др. // –Расплавы, 2002.– №4.– 22-26с.

[90]. Рахмонов К.А. Синтез и свойства сплавов алюминия с железом и редкоземельными металлами иттриевой подгруппы: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 02.00.04/ Рахмонов Киемидин Аслонхонович. –Душанбе, 2006. – 121с.

[91]. Олимов, Н.С. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата химических наук. –Душанбе. 1994 г.

[92]. Ганиев, И.Н. Окисление жидких сплавов высокочистого алюминия с кремнием и германием кислородом воздуха / И.Н. Ганиев, Н.С. Олимов, Б.Б. Эшов, Б.Б. Джабборов, Х.М. Мухиддинов // XIX совещание «Высокочистые вещества и металлические материалы на их основе»: тезисы докладов. - Суздаль, 1993.

[93]. Платунов, Е.С. Теплофизические измерения в монотонном режиме / Е.С. Платунов. –М.: Энергия, 1973. – 144 с.

[94]. Малый патент № ТЈ 510 Республика Таджикистан. Установка для измерения теплоемкости твердых тел / З. Низомов, Б. Гулов, Р. Саидов, З.Р.Обидов, Ф. Мирзоев, З. Авезов, Н.Ф. Иброхимов. Приоритет изобретения от 03.10.2011.

[95]. Измерение удельной теплоемкости твердых тел методом охлаждения / З. Низомов, Б. Гулов, Р.Х. Саидов, З. Авезов // Вестник Таджикского национального университета. –2010. –Вып.3(59). –С.136-141.

[96]. Гулов, Б.Н. Исследование температурной зависимости термодинамических свойств сплава АК1+2% Cu / Б.Н. Гулов, Р.Х. Саидов, З. Низомов // Вестник Таджикского технического университета. –2011. –Вып.3. –С.123-130.

[97]. Маджидов, Х. Теплоёмкость особо чистого алюминия в зависимости от температуры / Х. Маджидов, Б. Аминов, М. Сафаров [и др.] // Доклады АН ТаджССР. 1990. –Т.33. –№6. –С.380-383.

[98]. Низомов, З. Исследование температурной зависимости удельной теплоёмкости алюминия марок ОСЧ и А7 / З. Низомов, Б. Гулов, И.Н. Ганиев [и др.] // Доклады АН Республики Таджикистан. – 2011. –Т.54. –№1. –С.53-59.

[99]. Дасоян, М.А. Химические источники тока // М.А. Дасоян. -М.-Л.: Госэнергоиздат, 1961. –231 с.

[100]. Раджабалиев, С.С. Теплофизические свойства алюминия марки А7 и сплава Al + 2,18% Fe / С.С. Раджабалиев, И.Н. Ганиев, Н.Ф.

Иброхимов // Международная научно-практическая конференция «Новая наука: от идеи к результату». –Сургут, Российская Федерация, 2016.

[101]. Раджабалиев, С.С. Теплофизические и термодинамические функции алюминия, железа и сплава Al+2,18% Fe / С.С. Раджабалиев, И.Н.Ганиев, И.Т. Амонов, Н.Ф. Иброхимов // Сборник материалов Республиканской научно-практической конференции «Проблемы материаловедения в Республике Таджикистан», посвященной Дню химика и 80-летию со дня рождения д.т.н., проф., академика Международной инженерной академии А.В. Вахобова. – Душанбе, 2016. –С.88-91.

[102]. Температурная зависимость теплоёмкости сплава АК1+2% Cu, легированного РЗМ / З. Низомов, Р.Х. Саидов, Б.Н. Гулов [и др.] // Международная конференция «Современные вопросы молекулярной спектроскопии конденсированных сред». –Душанбе: Изд-во Таджикского национального университета, 2011. –С. 184-187.

[103]. Дасоян, М.А. Химические источники тока: монография // М.А. Дасоян. –М. Л. Госэнергоиздат, 1961. –231 с.

[104]. Ганиев, И.Н. Анодное поведение сплавов систем Al-Sn и Al-Pb в нейтральных средах / И.Н. Ганиев, И.Ш. Шукроев //ЖПХ, 1991. –№ 1. – С. 55-58.

[105]. Алюминиевые сплавы. Свойства, обработка, применение. Под ред. Дриц М.Е. –М.: Металлургия, 1979. –679с.

[106]. Джураева Л.Т. Кинетика высокотемпературного окисления сплавов системы Al-La (Ce, Pr) / Л.Т. Джураева, И.Н. Ганиев, Н.А. Курбонова // Тезисы докладов IV Уральской конференции по высокотемпературной физической химии и электрохимии. –Свердловск, 1985. – С.199.

[107]. Ганиев, И.Н. Окисления сплавов системы алюминий-неодим / И.Н. Ганиев, Л.Т. Джураева // Расплавы, 1995. –№4. –С.41-46.

[108]. Гулов С.С., Физико-химические свойства медистых силуминов, легированных элементами подгруппы германия: дис. к.т.н.: 02.00.04 / Гулов Саломидин Садридинович. –Душанбе, 2010. –160с.

[109]. Раджабалиев С.С. Кинетика окисления твёрдого сплава Al+2.18%Fe, легированного свинцом и оловом / С.С. Раджабалиев, И.Н. Ганиев, И.Т. Амонов, А.Э. Бердиев, // Доклады Академии наук Республики Таджикистан. –Душанбе, 2012. –№7, Т55. –С. 582-587.

[110]. Раджабалиев, С.С. Кинетика окисления сплава Al+2,18%Fe, модифицированного свинцом и висмутом, в твёрдом состоянии / С.С. Раджабалиев, И.Н. Ганиев, И.Т. Амонов, А.Э. Бердиев. // Вестник Таджикского технического университета им. акад. М.С. Осими. –Душанбе, 2014. –№4 (28). – С. 69-73.

[111]. Давлатов, О. Ш. Кинетика окисления алюминиевого сплава АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3, легированного оловом, в твердом состоянии/ Давлатов О. Ш., Ганиев И. Н., Раджабалиев С.С. //Известия СПБГТИ (Технического университета). – №56(82). – 2021. – С. 17-22.

[112]. Давлатов, О. Ш. Потенциостатическое исследование алюминиевого сплава АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3 легированного оловом/ Давлатов О. Ш., Ганиев И. Н., Одиназода Х.О., Раджабалиев С.С.// Политехнический вестник. Серия Инженерные исследования. –Душанбе: ТТУ имени акад. М.С. Осими. –№1 (53). –2021. –С. 33-37.

[113]. Давлатов, О. Ш. Электрохимическое поведение сплава АЖ1.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3, легированного оловом, в среде электролита 3%-ного NaCl/ Давлатов О. Ш., Ганиев И. Н., Одиназода Х.О., Раджабалиев С.С.// Политехнический вестник. Серия Инженерные исследования. –Душанбе: ТТУ имени акад. М.С. Осими. –№3 (47) –2019г. –С.63-66.

[114]. Луц, А.Р. Алюминий и его сплавы / А.Р. Луц, А.А. Суслина. – Самара: Самарск. Гос.тех. университет, 2013. –№19. –81 с.

[115]. Медиоланская, М.М. Электрохимическое поведение сплавов Fe-Al (анодное поведение сплавов): монография / М.М. Медиоланская, А.А. Ротинян, А.А. Янковский // ЖПХ, 1987. –№8. –С.1880– 1885.

[116]. Раджабалиев С.С., Ганиев И.Н., Амонов И.Т, Норова М.Т. Потенциодинамическое исследование сплава Al+2,18%Fe, легированного оловом и висмутом / С.С. Раджабалиев, И.Н. Ганиев, И.Т. Амонов, М.Т. Норова // Известия СПбГТИ (Технического университета), 2016. –№35(61). –С. 22-25

[117]. Раджабалиев, С.С., Анодное поведение сплава Al+2,18%Fe, легированного оловом / С.С. Раджабалиев, И.Н. Ганиев, И.Т. Амонов, М.Т. Норова // Вестник Таджикского технического университета им. акад. М.С. Осими –№2 (22). –2013. –С. 60-63.

[118]. Обидов, З.Р. Физико–химия цинк–алюминиевых сплавов с редкоземельными металлами: монография / З.Р. Обидов, И.Н. Ганиев. – Душанбе; «Андалеб», 2015. –334 с.

[119]. Красноярский, В.В. Коррозионно-электрохимические свойства сплавов алюминия с железом в нейтральных растворах / В.В. Красноярский, Н.Р. Сайдалиев // Э.И. «Защита от коррозии и окружающей среды», М. –1991. вып.3. –С.1479.

[120]. Амонов, И.Т. Обидов Коррозия сплава Al+2.18%Fe, легированного элементами подгруппы иттрия: монография / И.Т. Амонов, И.Н. Ганиев, З.Р. Обидов. –Германия: Изд. дом LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. –93с.

[121]. Мулоева Н.М. Потенциодинамическое исследование сплавов системы Pb-Sr в нейтральной среде / Н.М. Мулоева, И.Н. Ганиев и др. // Коррозия: Материалы и Защита, 2013. –№3. –С. 19-23.

[122]. Кечин В.А., Люблинский Е.Я. Цинковые сплавы. –М: Металлургия, 1986. –247 с.

[123]. Умарова, Т.М. Анодные сплавы алюминия с марганцем, железом и редкоземельными металлами / Т.М. Умарова, // –Душанбе: Дониш, 2009. –232 с.

[124]. Ганиев, И.Н. Коррозия двойных алюминиевых сплавов в нейтральных средах: монография / И.Н. Ганиев. –Германия: Изд. дом LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. –198 с.

[125]. Одинаев, Ф.Р. Влияние олова на анодное поведение сплава АЖ 4,5 в среде электролита NaCl / Ф.Р. Одинаев, А.Г. Сафаров, Д.С. Курякшоев, А.А. Акобиров, И.Н. Ганиев // Доклады АН Республики Таджикистан, 2015. –Т.58, №9. –С. 835–839.

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

[127]. Джайлоев, Дж.Х. Потенциодинамическое исследование сплава Al+2,18%Fe, легированного барием / Дж.Х. Джайлоев // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология, 2014. –Т.57, №2 –С.97-98.

[128]. Джайлоев, Дж.Х. Анодное поведение сплава Al+2,18%Fe, легированного кальцием, в среде электролита NaCl / Дж.Х. Джайлоев // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология, 2015. –Т.58, №12. –С. 38-42.

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

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

[131]. Умарова, Т.М. Коррозионное и электрохимическое поведение алюминия различной степени чистоты в нейтральной среде / Т.М. Умарова, И.Н. Ганиев // ДАН Республики Таджикистан. -2003. –Т. 46. -№1-2. -С.53-58.

[132]. Розловский, А.А. Электрохимическое рафинирование тяжелых легкоплавких металлов из расплавленных солей / А.А. Розловский, А.А. Булдаков, Г.Н. Ефимов. – Киев: Наукова думка, 1971. – 157 с.

[133]. Rolfs, U. Metallkundliche und electronics UntersuchungenUber die interkristalline Korrosion on einer AlMg - 9.56 Knetlegierung / U. Rolfs, H. Kaiser, H. Kirsches // Werkst. und Korros. - 1979. -V.30. -№8. -P.529-535.

ҶУМҲУРИИ  
ТОҶИКИСТОН



ИДОРАИ  
ПАТЕНТӢ

## ШАҲОДАТНОМА

Шахрванд Давлатов О.Ш.

муаллифи ихтирои *Хула дар асоси алюминий*

Ба ихтироъ  
нахустпатенти № ТҶ 1179 дода шудааст.

Дорандаи муассисаи давлатии "Парки технологӣ"-и Донишгоҳи  
нахустпатент техникаи Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ

Сарзамин Ҷумҳурии Тоҷикистон

Хаммуаллиф(он) Ғаниев И.Н., Одиназода Ҳ.О., Абдулло М.А.,  
Раджабалиев С.С., Якубов У.Ш.

Аввалияти ихтироъ 29.03.2021

Таърихи рӯзи пешниҳоди ариза 29.03.2021

Аризаи № 2101523

Дар Феҳристи давлатии ихтироъҳои Ҷумҳурии Тоҷикистон

10 августи с. 2021 ба қайд гирифта шуд

Нахустпатент  
этибор дорад аз 29 март с. 2021 то 29 март с. 2031

Ин шаҳодатнома хангоми амалӣ гардонидани ҳукуку  
имтиёзхое, ки барои муаллифони ихтироот бо конунгузории  
ҷорӣ муқаррар гардидаанд, нишон дода мешавад

ДИРЕКТОР

Исмоилзода М.

Натиҷаҳои таҳлили рентгенофазовии маҳсулотҳои оксидшавии хўлаи  
АЖ2.4М5.3МГ1.1ц4кр3 бо қалъагӣ, сурб, висмут

**Search-Match**

**Settings**

Search Range	7 to 70
Data Source	Raw data
Trust Intensities	Yes
Allow Zero Errors	No
Figure of Merit	Multi-phase
Apply Restrictions	Yes

**Matched Materials**

**A Periclase**

Formula	Mg O
Pdf Number	87-653
Figure of Merit	36%
Total Peaks	3
Peaks Matched	2
New Matches	2
Strong Unmatched	0
Peak Shift	0
Scale Factor	0.0153711
Concentration	0.0111764
I / Icorundum	3.03

**B Silicon Oxide**

Formula	Si O <sub>2</sub>
Pdf Number	81-68
Figure of Merit	19%
Total Peaks	14
Peaks Matched	3
New Matches	3
Strong Unmatched	0
Peak Shift	0
Scale Factor	0.013263

Concentration	0.0120625
I / Icorundum	3.79

### C Iron Silicon

Formula	Fe Si
Pdf Number	86-793
Figure of Merit	14%
Total Peaks	9
Peaks Matched	2
New Matches	2
Strong Unmatched	0
Peak Shift	0
Scale Factor	0.708259
Concentration	0.880392
I / Icorundum	5.18

### D Sapphire

Formula	$Mg_{3.5} Al_{4.5} ( Al_{4.5} Si_{1.5} O_{20} )$
Pdf Number	71-2398
Figure of Merit	14%
Total Peaks	199
Peaks Matched	41
New Matches	41
Strong Unmatched	0
Peak Shift	0
Scale Factor	0.266737
Concentration	0.0281638
I / Icorundum	0.44

### E Indialite

Formula	$Mg_{1.40} Fe_{0.66} Al_{3.96} Si_{5.04} O_{18}$
Pdf Number	83-2067
Figure of Merit	6%
Total Peaks	60
Peaks Matched	13
New Matches	13
Strong Unmatched	0
Peak Shift	0
Scale Factor	0.012725
Concentration	0.00790885
I / Icorundum	2.59

### **F Magnetite**

Formula	Fe <sub>2.957</sub> O <sub>4</sub>
Pdf Number	86-1349
Figure of Merit	5%
Total Peaks	10
Peaks Matched	4
New Matches	4
Strong Unmatched	0
Peak Shift	0
Scale Factor	0.00579979
Concentration	0.00673615
I / Icorundum	4.84

### **G Spinel, syn**

Formula	Mg Al <sub>2</sub> O <sub>4</sub>
Pdf Number	75-1798
Figure of Merit	10%
Total Peaks	11
Peaks Matched	4
New Matches	4
Strong Unmatched	1
Peak Shift	0
Scale Factor	0.0192131
Concentration	0.0077457
I / Icorundum	1.68

### **H Zinc Silicate**

Formula	Zn <sub>2</sub> Si O <sub>4</sub>
Pdf Number	70-2488
Figure of Merit	12%
Total Peaks	25
Peaks Matched	4
New Matches	4
Strong Unmatched	1
Peak Shift	0
Scale Factor	0.0335968
Concentration	0.0354736
I / Icorundum	4.4

### **I Copper Magnesium Oxide**

Formula	Cu <sub>2</sub> Mg O <sub>3</sub>
Pdf Number	41-1364
Figure of Merit	4%

Total Peaks	30
Peaks Matched	5
New Matches	5
Strong Unmatched	0
Peak Shift	0
Scale Factor	0.0226798
Concentration	0.0103407
I / Icorundum	1.9

***Peak List***

**Peak Search Settings**

Confidence Threshold	90%
Matched / Total	29 / 33

**List of Peaks**

<i>2-Theta</i>	<i>D-Spacing</i>	<i>Intensity</i>	<i>Width</i>	<i>Confidence</i>	<i>Matches</i>
10.439	8.4676	60	0.149	95.0%	E
10.930	8.0879	59	0.187	95.1%	D
19.492	4.5503	51	0.145	99.5%	
21.065	4.2140	120	0.172	100%	
22.755	3.9046	47	0.160	99.3%	BD
23.756	3.7424	30	0.164	93.2%	
25.207	3.5301	29	0.160	90.9%	D
28.855	3.0916	96	0.199	100%	BDI
29.408	3.0347	50	0.149	99.7%	E
29.866	2.9892	92	0.152	100%	D
31.717	2.8188	258	0.176	100%	H
32.989	2.7130	29	0.142	93.5%	H
35.283	2.5417	34	0.158	97.1%	F
36.715	2.4457	101	0.181	100%	DEG
38.288	2.3488	44	0.221	99.2%	D
38.927	2.3117	2520	0.160	100%	D
40.678	2.2162	29	0.169	92.2%	DH
42.407	2.1297	106	0.211	100%	BD
43.039	2.0999	109	0.175	100%	ADE
43.602	2.0741	63	0.172	100%	

45.152	2.0064	4497	0.153	100%	CD
47.751	1.9031	107	0.171	100%	EI
48.258	1.8843	40	0.162	98.7%	DE
48.931	1.8599	28	0.166	93.8%	DGHI
49.542	1.8384	26	0.192	92.8%	D
51.346	1.7780	35	0.157	98.2%	DH
52.728	1.7346	70	0.188	100%	DI
57.438	1.6030	24	0.171	90.3%	DE
60.331	1.5329	28	0.132	91.8%	E
62.542	1.4839	45	0.177	99.7%	AE
63.356	1.4668	24	0.166	91.4%	H
65.590	1.4221	1217	0.182	100%	F
66.746	1.4003	34	0.171	98.6%	E

**AK2.4M5.3Mr1.1Q4Kp3+0.5%Sn**

***Search-Match***

**Settings**

Search Range	7 to 70
Data Source	Raw data
Trust Intensities	Yes
Allow Zero Errors	No
Figure of Merit	Multi-phase
Apply Restrictions	Yes

**Matched Materials**

**A Silicon**

Formula	Si
Pdf Number	77-2108
Figure of Merit	36%
Total Peaks	5
Peaks Matched	4
New Matches	4
Strong Unmatched	0
Peak Shift	0
Scale Factor	0.0259551
Concentration	0.0214225
I / Icorundum	4.55

### **B Aluminum, syn**

Formula	Al
Pdf Number	4-787
Figure of Merit	25%
Total Peaks	3
Peaks Matched	3
New Matches	3
Strong Unmatched	0
Peak Shift	0
Scale Factor	0.725218
Concentration	0.476227
I / Icorundum	3.62

### **C Copper Tin**

Formula	Cu <sub>41</sub> Sn <sub>11</sub>
Pdf Number	30-510
Figure of Merit	19%
Total Peaks	12
Peaks Matched	2
New Matches	2
Strong Unmatched	0
Peak Shift	0
Scale Factor	0.0135773
Concentration	0.0200235
I / Icorundum	8.13

### **D Cuprite**

Formula	Cu <sub>2</sub> O
Pdf Number	78-2076
Figure of Merit	18%
Total Peaks	7
Peaks Matched	2
New Matches	2
Strong Unmatched	0
Peak Shift	0
Scale Factor	0.0246404
Concentration	0.0370097
I / Icorundum	8.28

### **E Iron Oxide**

Formula	Fe <sub>0.974</sub> O
Pdf Number	73-2145
Figure of Merit	15%
Total Peaks	5
Peaks Matched	3
New Matches	3
Strong Unmatched	0
Peak Shift	0
Scale Factor	0.0190898
Concentration	0.0169335
I / Icorundum	4.89

### **F Quartz, syn**

Formula	Si O <sub>2</sub>
Pdf Number	74-764
Figure of Merit	13%
Total Peaks	17
Peaks Matched	5
New Matches	5
Strong Unmatched	0
Peak Shift	0
Scale Factor	0.00968677
Concentration	0.00778429
I / Icorundum	4.43

### **G Cristobalite alpha**

Formula	Si O <sub>2</sub>
Pdf Number	82-1234
Figure of Merit	11%
Total Peaks	29
Peaks Matched	2
New Matches	2
Strong Unmatched	0
Peak Shift	0
Scale Factor	0.0107698
Concentration	0.00898677
I / Icorundum	4.6

### H Spinel, syn

Formula	Mg Al <sub>2</sub> O <sub>4</sub>
Pdf Number	75-1795
Figure of Merit	11%
Total Peaks	11
Peaks Matched	4
New Matches	4
Strong Unmatched	1
Peak Shift	0
Scale Factor	0.292948
Concentration	0.0914021
I / Icorundum	1.72

### I Aluminum Oxide

Formula	Al O
Pdf Number	75-278
Figure of Merit	9%
Total Peaks	6
Peaks Matched	2
New Matches	2
Strong Unmatched	1
Peak Shift	0
Scale Factor	0.0313878
Concentration	0.0190171
I / Icorundum	3.34

### J Silicon Oxide

Formula	Si <sub>96</sub> O <sub>192</sub>
Pdf Number	87-2275
Figure of Merit	8%
Total Peaks	198
Peaks Matched	45
New Matches	45
Strong Unmatched	0
Peak Shift	0
Scale Factor	0.0187772
Concentration	0.0814417
I / Icorundum	23.91

### K Sapphirine 2 M

Formula	Al <sub>3.80</sub> Mg <sub>3.15</sub> Fe <sub>1.05</sub> ( Si <sub>1.75</sub> Al <sub>4.25</sub> O <sub>20</sub> )
---------	--

Pdf Number	86-2245
Figure of Merit	15%
Total Peaks	199
Peaks Matched	35
New Matches	35
Strong Unmatched	0
Peak Shift	0
Scale Factor	0.161612
Concentration	0.0152445
I / Icorundum	0.52

### **L Magnesium Silicate**

Formula	Mg <sub>2</sub> Si O <sub>4</sub>
Pdf Number	74-1681
Figure of Merit	11%
Total Peaks	11
Peaks Matched	3
New Matches	3
Strong Unmatched	1
Peak Shift	0
Scale Factor	0.0285108
Concentration	0.00868872
I / Icorundum	1.68

### **M Magnesium Zinc**

Formula	Mg <sub>102.08</sub> Zn <sub>39.60</sub>
Pdf Number	41-1292
Figure of Merit	7%
Total Peaks	177
Peaks Matched	30
New Matches	30
Strong Unmatched	0
Peak Shift	0
Scale Factor	0.141141
Concentration	0.0299555
I / Icorundum	1.17

### **N Tin Oxide**

Formula	Sn O
Pdf Number	72-1012
Figure of Merit	1%
Total Peaks	15

Peaks Matched	5
New Matches	5
Strong Unmatched	1
Peak Shift	0
Scale Factor	0.0597616
Concentration	0.165863
I / Icorundum	15.3

**Peak List**

**Peak Search Settings**

Confidence Threshold	90%
Matched / Total	38 / 44

**List of Peaks**

<i>2-Theta</i>	<i>D-Spacing</i>	<i>Intensity</i>	<i>Width</i>	<i>Confidence</i>	<i>Matches</i>
7.885	11.2030	56	0.141	92.3%	J
8.333	10.6022	79	0.137	98.8%	
9.456	9.3450	94	0.157	99.3%	
9.924	8.9056	101	0.164	99.5%	J
11.052	7.9989	53	0.143	93.7%	J
13.435	6.5851	58	0.157	97.2%	
15.683	5.6457	44	0.141	98.1%	JK
17.526	5.0559	36	0.147	94.0%	M
18.678	4.7466	49	0.137	99.4%	J
19.179	4.6239	37	0.191	96.5%	K
20.731	4.2810	117	0.166	100%	JK
22.371	3.9707	75	0.173	100%	G
23.385	3.8009	43	0.145	99.0%	J
24.654	3.6080	38	0.173	98.0%	JKM
26.264	3.3904	34	0.143	96.2%	FJ
28.505	3.1287	98	0.176	100%	AJ
30.257	2.9514	37	0.148	97.2%	J
31.423	2.8445	293	0.188	100%	K
32.954	2.7158	27	0.158	90.1%	JK
35.457	2.5296	29	0.126	90.2%	JM
35.811	2.5054	30	0.136	93.6%	E
36.448	2.4630	152	0.194	100%	DJKLM
37.911	2.3713	92	0.236	100%	JM
38.541	2.3340	3834	0.152	100%	BHJKM
39.306	2.2903	29	0.228	92.0%	M
40.748	2.2125	37	0.152	94.4%	K
42.026	2.1481	98	0.221	100%	E

42.669	2.1173	123	0.168	100%	C
43.362	2.0850	62	0.168	100%	G
44.811	2.0209	1275	0.174	100%	BHKM
47.403	1.9162	145	0.165	100%	ACM
47.878	1.8983	85	0.165	100%	KN
52.543	1.7403	77	0.217	100%	DM
54.235	1.6899	41	0.155	99.7%	
55.591	1.6518	24	0.174	90.8%	HKM
56.195	1.6355	38	0.183	99.1%	AFIK
56.809	1.6193	30	0.150	96.2%	KM
58.365	1.5798	29	0.160	95.4%	
58.897	1.5668	31	0.147	91.4%	AFM
62.552	1.4837	48	0.203	99.9%	N
63.900	1.4556	31	0.157	97.1%	M
65.250	1.4287	625	0.191	100%	BHM
66.550	1.4039	33	0.144	97.6%	FM
67.524	1.3860	23	0.144	91.5%	

**AЖ2.4M5.3MГ1.1Ц4Kp3+0.5%Pb**

*Search-Match*

**Settings**

Search Range	7 to 70
Data Source	Raw data
Trust Intensities	Yes
Allow Zero Errors	No
Figure of Merit	Multi-phase
Apply Restrictions	Yes

**Matched Materials**

**A Aluminum**

Formula	Al
Pdf Number	85-1327
Figure of Merit	35%
Total Peaks	3
Peaks Matched	3

New Matches	3
Strong Unmatched	0
Peak Shift	0
Scale Factor	0.989599
Concentration	0.000818146
I / Icorundum	4.1

**B WPIstite**

Formula	Fe <sub>0.9646</sub> O
Pdf Number	74-1883
Figure of Merit	22%
Total Peaks	3
Peaks Matched	2
New Matches	2
Strong Unmatched	0
Peak Shift	0
Scale Factor	0.076444
Concentration	7.47606e-005
I / Icorundum	4.85

**C Silicon, syn**

Formula	Si
Pdf Number	27-1402
Figure of Merit	18%
Total Peaks	4
Peaks Matched	2
New Matches	2
Strong Unmatched	0
Peak Shift	0
Scale Factor	0.0829348

Concentration		7.86e-005
I / Icorundum		4.7
	<b>D Lead</b>	
Formula		Pb
Pdf Number		87-663
Figure of Merit		16%
Total Peaks		5
Peaks Matched		3
New Matches		3
Strong Unmatched		0
Peak Shift		0
Scale Factor		0.0920723
Concentration		0.000474731
I / Icorundum		25.57
	<b>E Spinel</b>	
Formula		( Mg <sub>0.4</sub> Al <sub>0.6</sub> ) Al <sub>1.8</sub> O <sub>4</sub>
Pdf Number		87-344
Figure of Merit		14%
Total Peaks		9
Peaks Matched		3
New Matches		3
Strong Unmatched		0
Peak Shift		0
Scale Factor		0.0625925
Concentration		2.06992e-005
I / Icorundum		1.64

**F Spinel, syn**

Formula	$\text{Al}_2 \text{Mg O}_4$
Pdf Number	73-559
Figure of Merit	11%
Total Peaks	11
Peaks Matched	5
New Matches	5
Strong Unmatched	1
Peak Shift	0
Scale Factor	0.952046
Concentration	0.000408908
I / Icorundum	2.13

**G Magnesium Iron Oxide**

Formula	$(\text{Mg O})_{0.91} (\text{Fe O})_{0.09}$
Pdf Number	77-2365
Figure of Merit	10%
Total Peaks	3
Peaks Matched	2
New Matches	2
Strong Unmatched	0
Peak Shift	0
Scale Factor	0.052368
Concentration	3.38968e-005
I / Icorundum	3.21

**H Silicon Oxide**

Formula	$(\text{Si O}_2)_{64}$
Pdf Number	88-1461

Figure of Merit	6%
Total Peaks	199
Peaks Matched	43
New Matches	43
Strong Unmatched	0
Peak Shift	0
Scale Factor	0.126539
Concentration	8.34372e-005
I / Icorundum	3.27

#### I Silicon Aluminum Oxide

Formula	Si <sub>11.96</sub> Al <sub>0.04</sub> O <sub>24</sub>
Pdf Number	80-922
Figure of Merit	3%
Total Peaks	199
Peaks Matched	44
New Matches	44
Strong Unmatched	0
Peak Shift	0
Scale Factor	0.0919597
Concentration	4.39474e-005
I / Icorundum	2.37

#### J Silicon Oxide

Formula	Si <sub>16</sub> O <sub>32</sub>
Pdf Number	49-629
Figure of Merit	3%
Total Peaks	150
Peaks Matched	22
New Matches	22
Strong Unmatched	0
Peak Shift	0
Scale Factor	0.0678415
Concentration	4.97949e-005
I / Icorundum	3.64

#### K Magnesium Copper Oxide

Formula	Mg <sub>.90</sub> Cu <sub>.10</sub> O
Pdf Number	77-2181
Figure of Merit	6%
Total Peaks	3
Peaks Matched	1

New Matches	1
Strong Unmatched	1
Peak Shift	0
Scale Factor	0.0442786
Concentration	2.91964e-005
I / Icorundum	3.27

#### **L Magnesium Silicate**

Formula	Mg <sub>2</sub> ( Si O <sub>4</sub> )
Pdf Number	87-2033
Figure of Merit	6%
Total Peaks	9
Peaks Matched	2
New Matches	2
Strong Unmatched	0
Peak Shift	0
Scale Factor	0.0652057
Concentration	2.65598e-005
I / Icorundum	2.02

#### **M Lead Silicate**

Formula	Pb <sub>36</sub> ( ( Si <sub>2</sub> O <sub>7</sub> ) <sub>6</sub> ( Si <sub>4</sub> O <sub>13</sub> ) <sub>3</sub> O <sub>3</sub> )
Pdf Number	44-271
Figure of Merit	3%
Total Peaks	75
Peaks Matched	16
New Matches	16
Strong Unmatched	1
Peak Shift	0
Scale Factor	0.189039
Concentration	3.58316e-005
I / Icorundum	0.94

#### **N Aluminum Magnesium**

Formula	Al <sub>12</sub> Mg <sub>17</sub>
Pdf Number	73-1148
Figure of Merit	2%
Total Peaks	28
Peaks Matched	7
New Matches	7
Strong Unmatched	0
Peak Shift	0
Scale Factor	0.0368008
Concentration	1.78839e-005

I / Icorundum	2.41
<b>O Lead Silicate</b>	
Formula	Pb <sub>2</sub> Si O <sub>4</sub>
Pdf Number	74-690
Figure of Merit	4%
Total Peaks	195
Peaks Matched	37
New Matches	37
Strong Unmatched	0
Peak Shift	0
Scale Factor	38.8191
Concentration	0.995681
I / Icorundum	127.2
<b>P Lead Oxide</b>	
Formula	Pb <sub>0.98</sub> O <sub>2</sub>
Pdf Number	75-2414
Figure of Merit	6%
Total Peaks	33
Peaks Matched	8
New Matches	8
Strong Unmatched	0
Peak Shift	0
Scale Factor	0.0632176
Concentration	0.000213521
I / Icorundum	16.75
<b>Q Lead Oxide</b>	
Formula	Pb <sub>3</sub> O <sub>4</sub>
Pdf Number	71-561
Figure of Merit	1%
Total Peaks	63
Peaks Matched	9
New Matches	9
Strong Unmatched	1
Peak Shift	0
Scale Factor	0.647166
Concentration	0.00170822
I / Icorundum	13.09
<b>R Lead Oxide</b>	
Formula	Pb O
Pdf Number	78-1665
Figure of Merit	1%
Total Peaks	24

Peaks Matched	7
New Matches	7
Strong Unmatched	1
Peak Shift	0
Scale Factor	0.0431167
Concentration	0.000201185
I / Icorundum	23.14

**Peak List**

**Peak Search Settings**

Confidence Threshold	90%
Matched / Total	39 / 42

**List of Peaks**

<i>2-Theta</i>	<i>D-Spacing</i>	<i>Intensity</i>	<i>Width</i>	<i>Confidence</i>	<i>Matches</i>
8.429	10.4809	57	0.169	94.3%	
9.723	9.0896	64	0.178	90.6%	J
12.475	7.0898	57	0.174	98.6%	HI
13.327	6.6381	72	0.194	99.6%	I
15.035	5.8878	58	0.164	95.9%	O
16.026	5.5258	31	0.175	90.1%	IJO
17.613	5.0312	43	0.140	99.2%	I
19.140	4.6332	38	0.172	97.6%	
19.595	4.5267	39	0.160	97.2%	EIO
20.116	4.4105	82	0.183	100%	HJMOQ
20.712	4.2851	102	0.188	100%	HMNO
21.685	4.0949	63	0.170	100%	
22.439	3.9590	56	0.216	99.9%	O
25.607	3.4759	28	0.179	92.9%	HIO
28.476	3.1318	84	0.192	100%	CIJMOP
29.358	3.0397	46	0.216	99.6%	HINO
31.303	2.8551	229	0.197	100%	FIO
31.901	2.8029	27	0.127	93.5%	HIJOR
36.326	2.4711	146	0.206	100%	BDHIJO
37.887	2.3728	55	0.222	99.9%	EHJO
38.509	2.3358	1207	0.182	100%	AFIJO
39.392	2.2855	52	0.314	100%	HIJOQ
42.054	2.1468	135	0.197	100%	BHIJNO
42.655	2.1179	168	0.188	100%	HIPR
43.352	2.0855	55	0.182	99.9%	HQ
44.732	2.0243	1302	0.188	100%	AH
45.765	1.9809	39	0.300	99.0%	HMR
47.403	1.9162	149	0.180	100%	CHQ
47.918	1.8968	52	0.165	99.8%	H

49.179	1.8511	24	0.168	90.8%	FH
50.682	1.7997	46	0.174	99.8%	H
51.203	1.7826	43	0.163	99.6%	M
52.316	1.7473	58	0.235	100%	HP
53.165	1.7213	28	0.159	92.3%	H
57.289	1.6069	31	0.196	97.6%	E
59.035	1.5634	27	0.183	95.6%	MP
61.601	1.5043	37	0.164	98.4%	M
62.239	1.4904	58	0.234	100%	KMN
65.266	1.4284	1065	0.194	100%	F
66.023	1.4139	26	0.228	92.6%	Q
67.308	1.3900	50	0.223	99.9%	E
67.918	1.3789	35	0.171	93.0%	LP

**AЖ2.4M5.3Mг1.1Ц4Kp3+0.5%Bi**

**Search-Match  
Settings**

Search Range	7 to 70
Data Source	Raw data
Trust Intensities	Yes
Allow Zero Errors	No
Figure of Merit	Multi-phase
Apply Restrictions	Yes

**Matched Materials**

**A Aluminum**

Formula	Al
Pdf Number	85-1327
Figure of Merit	25%
Total Peaks	3
Peaks Matched	3
New Matches	3
Strong Unmatched	0
Peak Shift	0
Scale Factor	0.480452
Concentration	0.279831
I / Icorundum	4.1

**B Aluminum Oxide**

Formula	Al O
Pdf Number	75-278
Figure of Merit	9%
Total Peaks	6
Peaks Matched	1

New Matches	1
Strong Unmatched	1
Peak Shift	0
Scale Factor	0.0348727
Concentration	0.016546
I / Icorundum	3.34

### C Corundum

Formula	$\text{Al}_2\text{O}_3$
Pdf Number	75-785
Figure of Merit	1%
Total Peaks	13
Peaks Matched	2
New Matches	2
Strong Unmatched	1
Peak Shift	0
Scale Factor	0.132773
Concentration	0.0409289
I / Icorundum	2.17

### D Aluminum Iron

Formula	$\text{Al}_{0.4}\text{Fe}_{0.6}$
Pdf Number	45-982
Figure of Merit	22%
Total Peaks	4
Peaks Matched	1
New Matches	1
Strong Unmatched	0
Peak Shift	0
Scale Factor	0.035475
Concentration	Not available

### E Zinc Aluminum Iron Oxide

Formula	$\text{Zn}(\text{Al}_{1.4}\text{Fe}_{0.6})\text{O}_4$
Pdf Number	82-1039
Figure of Merit	6%
Total Peaks	11
Peaks Matched	3
New Matches	3
Strong Unmatched	1
Peak Shift	0
Scale Factor	0.0479972

Concentration	0.0290461
I / Icorundum	4.26

### F Aluminum Iron Oxide

Formula	Al Fe O <sub>3</sub>
Pdf Number	84-2154
Figure of Merit	1%
Total Peaks	87
Peaks Matched	12
New Matches	12
Strong Unmatched	1
Peak Shift	0
Scale Factor	0.241286
Concentration	0.053471
I / Icorundum	1.56

### G Magnesium Aluminum Iron Oxide

Formula	Mg Al <sub>1.9</sub> Fe <sub>1</sub> O <sub>4</sub>
Pdf Number	74-1135
Figure of Merit	11%
Total Peaks	11
Peaks Matched	4
New Matches	4
Strong Unmatched	1
Peak Shift	0
Scale Factor	1.38866
Concentration	0.357056
I / Icorundum	1.81

### H Sapphirine 2 M

Formula	Al <sub>3.80</sub> Mg <sub>3.15</sub> Fe <sub>1.05</sub> ( Si <sub>1.75</sub> Al <sub>4.25</sub> O <sub>20</sub> )
Pdf Number	86-2245
Figure of Merit	13%
Total Peaks	199
Peaks Matched	33
New Matches	33
Strong Unmatched	0
Peak Shift	0
Scale Factor	0.416687
Concentration	0.0307805
I / Icorundum	0.52

### I Chabazite - artificial

Formula	Si O <sub>2</sub>
Pdf Number	89-735
Figure of Merit	5%
Total Peaks	112
Peaks Matched	17
New Matches	17
Strong Unmatched	0
Peak Shift	0
Scale Factor	0.104595
Concentration	0.0962828
I / Icorundum	6.48

### J Sekaninaite

Formula	Mg <sub>0.34</sub> Fe <sub>1.66</sub> Al <sub>4</sub> Si <sub>5</sub> O <sub>18</sub>
Pdf Number	83-1600
Figure of Merit	2%
Total Peaks	160
Peaks Matched	16
New Matches	16
Strong Unmatched	1
Peak Shift	0
Scale Factor	0.12557
Concentration	0.0330004
I / Icorundum	1.85

### K Bismuth Oxide Silicate

Formula	Bi <sub>2</sub> O <sub>2</sub> Si O <sub>3</sub>
Pdf Number	75-1483
Figure of Merit	2%
Total Peaks	57
Peaks Matched	8
New Matches	8
Strong Unmatched	0
Peak Shift	0
Scale Factor	0.0306768
Concentration	0.063058
I / Icorundum	14.47

#### *Peak List*

#### **Peak Search Settings**

Confidence Threshold	90%
Matched / Total	18 / 21

### List of Peaks

<i>2-Theta</i>	<i>D-Spacing</i>	<i>Intensity</i>	<i>Width</i>	<i>Confidence</i>	<i>Matches</i>
9.052	9.7616	82	0.076	94.3%	
9.822	8.9973	71	0.073	92.3%	
12.452	7.1024	60	0.080	94.7%	H
13.421	6.5921	56	0.081	90.5%	
16.351	5.4166	42	0.073	91.9%	HI
20.809	4.2652	130	0.101	100%	FHJ
21.685	4.0949	55	0.076	98.5%	J
29.384	3.0371	44	0.096	95.9%	JK
31.329	2.8528	95	0.098	100%	GHIJ
31.582	2.8306	65	0.074	99.1%	BI
34.225	2.6178	38	0.070	93.2%	H
36.422	2.4648	44	0.110	94.4%	EHJ
38.582	2.3316	812	0.105	100%	AGHJ
42.022	2.1483	76	0.116	99.8%	CF
42.628	2.1192	88	0.105	100%	FIJ
44.249	2.0452	55	0.074	96.8%	DEIJK
44.830	2.0201	858	0.107	100%	AGHI
47.854	1.8999	85	0.075	99.6%	HIJ
50.910	1.7922	36	0.079	94.9%	H
63.840	1.4568	50	0.079	93.5%	FIJK
65.252	1.4288	812	0.094	100%	GI