

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ БІЛІМ ЖӘНЕ ҒЫЛЫМ МИНИСТРЛІГІ

Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті

Металлургия және өнеркәсіптік инженерия институты
Инженерлік физика кафедрасы

Ербол Талшын

«Беріктігі жоғары алюминий-цирконий қорытпаларының оңтайлы
термиялық өңдеу режимдерін табу»

МАГИСТРЛІК ДИССЕРТАЦИЯ

7М07103 – «Материалтану және жаңа материалдар технологиясы» мамандығы

Алматы 2021

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ БІЛІМ ЖӘНЕ ҒЫЛЫМ МИНИСТРЛІГІ

Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті

Металлургия және өнеркәсіптік инженерия институты

ӘОЖ 669.713.3

Қолжазба құқығында

Ербол Талшын


Магистр академиялық дәрежесін алу үшін дайындалған

МАГИСТРЛІК ДИССЕРТАЦИЯ

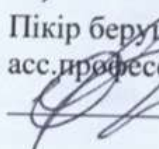
Диссертация атауы «Беріктігі жоғары алюминий-цирконий корытпаларының оңтайлы термиялық өңдеу режимдерін табу»

Дайындау бағыты 7M07103 – Материатану және жаңа материалдар технологиясы

Ғылыми жетекші,
т.ғ.д., профессор

 Д.У. Смагулов

Пікір беруші,
асс. профессор, PhD доктор

 А.О. Омарбекова

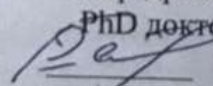
Норма бақылаушы,
PhD доктор, лектор

 Телешева А.Б

**ҚОРҒАУҒА
ЖІБЕРІЛДІ**

«Инженерлік физика»
кафедра меңгерушісі

PhD доктор

 Р.Е. Бейсенов

«24» маусым 2021ж.

Алматы 2021

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ БІЛІМ ЖӘНЕ ҒЫЛЫМ МИНИСТРЛІГІ

Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті

Металлургия және өнеркәсіптік инженерия институты

Инженерлік физика кафедрасы

7M07103 – Материалтану және жаңа материалдар технологиясы

БЕКІТЕМІН

«Инженерлік физика»
кафедра меңгерушісі

PhD доктор, асс.профессор

Р.Е. Бейсенов

“24” маусым 20__ ж.

**Магистрлік диссертация орындауға
ТАПСЫРМА**

Магистрант *Ербол Талиын*

Тақырыбы : Беріктігі жоғары алюминий-цирконий қорытпаларының оптималды термиялық өңдеу режимін табу.

Университет Ректорының 2019 жылғы "03" желтоқсан №435-М бұйрығымен бекітілген

Аяқталған жұмысты тапсыру мерзімі 2021 жылғы "28" маусым

Магистрлік диссертацияның бастапқы берілістері: Тәжірибелік жұмыстардан алынған материалдар; ғылыми техникалық дереккөздер

Магистрлік диссертацияда қарастырылатын мәселелер тізімі

а) қазіргі заманғы Thermo-Calc(Швеция) компьютерлік программасын пайдалана отырып, көп компонентті системалардың фазалық диаграммаларының политермиялық және изотермиялық кималарын тұрғызу.

б) алюминий қорытпаларында орын алатын фазалық және құрылымдық өзгерістерді температураға және олардың химиялық құрамына байланысты зерттеу;

в) беріктігі жоғары алюминий-цирконий қорытпаларын термиялық өңдеудің оптимал режимдерін әзірлеу;

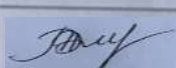
Сызба материалдар тізімі (міндетті сызбалар дәл көрсетілуі тиіс)

Ұсынылатын негізгі әдебиет: Белов Н.А. Фазовый состав алюминиевых сплавов. - М.: Издательский Дом МИСиС, 2009. – 392 с.Мондольфо Л.Ф. Структура и свойства сплавов / пер. с англ. – М.: Металлургия, 1979. - 640 с.

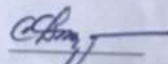
Магистрлік диссертация дайындау
КЕСТЕСІ

Бөлімдер атауы, қарастырылатын мәселелер тізімі	Ғылыми жетекші мен кеңесшілерге көрсету мерзімдері	Ескерту
Ғылыми – технологиялық проблемаларға шолу	Желтоқсан 2019	
Зерттеу әдістемелері	Қыркүйек 2020	
Зерттеу нәтижелері	Қаңтар 2021	
Эксперименттік зерттеулер	Мамыр 2021	

Аяқталған магистрлік диссертация бөлімдеріне кеңесшілер мен норма бақылаушының қойған қолтаңбалары


Бөлімдер атауы	Кеңесшілер, аты, әкесінің аты, тегі (ғылыми дәрежесі, атағы)	Қол қойылған күні	Қолы
Норма бақылаушы	Телешева А.Б. PhD доктор	17.06.2021	

Ғылыми жетекші



Смагулов Д.У.

Тапсырманы орындауға алған білім алушы



Ербол Т.

Күні

"24" маусым 2021 ж.

АҢДАТПА

Магистерлік диссертацияда алюминий негізіндегі Al – Cu – Mn – Zr системасының фазалық диаграммалары есептелді және тұрғызылды. Алюминий қорытпаларында орын алатын фазалық және құрылымдық өзгерістерді температураға және олардың химиялық құрамына байланысты зерттелді. Алюминий қорытпасының құйма күйіндегі фазалық құрамы, құрылысы мен қасиеттері зерттелді. Al–Cu–Mn–Zr системасы қорытпасын термиялық өңдеудің оптимал режимі жасалды.

АННОТАЦИЯ

В магистерской диссертации рассчитаны и построены фазовые диаграммы системы на основе алюминия Al – Cu – Mn – Zr. Изучены фазовые и структурные изменения, происходящие в алюминиевых сплавах, в зависимости от температуры и их химического состава. Изучены фазовый состав, строение и свойства алюминиевого сплава в слитке. Разработан оптимальный режим термической обработки сплава системы Al–Cu–Mn–Zr.

ANNOTATION

In the master's thesis, the phase diagrams of the system based on aluminum Al – Cu – Mn – Zr were calculated and constructed. The phase and structural changes occurring in aluminum alloys, depending on the temperature and their chemical composition were studied. The phase composition, structure and properties of an aluminum alloy in an ingot have been studied. The optimal mode of heat treatment of the alloy of the system Al–Cu–Mn–Zr has been developed.

МАЗМҰНЫ

КІРІСПЕ

1	Ғылыми – технологиялық проблемаларға шолу	11
1.1	Алюминий қорытпаларының құрылымы мен фазалық құрамы	11
1.2	Алюминий қорытпаларындағы өтпелі элементтердің өзара әрекеттесуінің ерекшеліктері	18
1.3	Цирконийдің алюминий қорытпаларының құрылымы мен қасиеттеріне әсері.	21
2	Зерттеу әдістемелері	25
2.1	Қорытпалар мен үлгілерді зерттеуге дайындау	25
2.2	Қорытпалардың механикалық қасиеттерін анықтау	25
2.2.1	Микроқаттылықты өлшеу	25
2.2.2	Бринелл қаттылығын өлшеу	26
2,3	Оптикалық және растрлық электронды микроскопия	27
2,4	Көп компонентті жүйелердің фазалық диаграммаларын компьютерлік есептеу	28
3	Зерттеу нәтижелері	30
3.1	Al–Cu–Mn–Zr системасының фазалық диаграммасы - беріктігі жоғары алюминий қорытпаларының негізі.	30
3.2	Фазалық диаграммалардың изотермиялық және политермиялық қималары.	31
3.3	Al–Cu–Mn–Zr системасы қорытпаларының фазалық құрамына, құрылысына және қасиеттеріне легірлеуші элементтер мен қоспалардың әсері.	36
3.4	Алюминий негізіндегі құйма қорытпалардың микроқұрылысы	39
3.4.1	Алюминий қорытпаларының қасиеттеріне оларды қыздырып өңдеу температурасының әсері	40
3.4.2	Үнемді легирленген, беріктігі жоғары алюминий қорытпаларының оптимал құрамын анықтау	45

ҚОРЫТЫНДЫ

ПАЙДАЛАНҒАН ӘДЕБИЕТТЕР

КІРІСПЕ

Алюминий және оның қорытпалары қасиеттерінің бірегей үйлесімі а рқасында қазіргі заманғы өркениеттің ең маңызды материалдарының бірі бо лып табылады. Ол бірінші кезекте экологиямен және энергия үнемдеумен ба йланысты әлемдік қоғамдастықтың жаһандық проблемаларын тиімді шешуге мүмкіндік береді. Әлемдік тәжірибе алюминийді тұтыну ауқымы көлік, ма шина жасау, құрылыс, электротехника, тамақ өнеркәсібі және т. б. сияқты жетекші салалардың ғылыми-техникалық прогресін анықтайтындығын көрсетеді.

Алюминий қорытпалары құрылымдық материалдар арасында ерекше о рын алады. Бұл олардың негізгі қасиеттері мен пайдалану сипаттамаларының ерекше үйлесіміне қол жеткізу мүмкіндігімен байланысты. Құю және дефо рмацияланатын алюминий қорытпалары төмен тығыздыққа, жоғары беріктікке, икемділікке және технологияға байланысты машина жасауда, авиа циялық және ғарыштық технологияда қолданылатын ең перспективалы құрылымдық материалдар болып табылады. Өнеркәсіптік өндірістің барлық салаларының, әсіресе машина жасау, аспап жасау, мұнай-газ саласы, мета ллургия және химия өнеркәсібі, авиация және ғарыш техникасының жедел да муына байланысты жақын болашақта алюминий қорытпаларына қажеттілік күрт артады.

Жұмыстың мақсаты. Алюминий негізіндегі көп компонентті система лардың фазалық диаграммаларын есептеу және эксперименттік құру, ола рдың негізінде беріктігі жоғары алюминий қорытпаларын алу, оларды құю және термиялық өңдеу режимдерін жасау.

Зерттеу нысаны. Алюминий негізіндегі көп компонентті системала рдың фазалық диаграммалары, алюминий қорытпалары және оларды өңдеу технологиялары; металл системаларының фазалық өзгерістерін есептеу және фазалық диаграммаларын құру әдістері мен бағдарламалары.

Жұмыста шешілетін мәселелер:

1) қазіргі заманғы Thermo–Calc (Швеция) компьютерлік программа сын пайдалана отырып, көп компонентті системалардың фазалық диагра ммаларының политермиялық және изотермиялық қималарын тұрғызу.

2) алюминий қорытпаларында орын алатын фазалық және құрылымдық өзгерістерді температураға және олардың химиялық құра мына байланысты зерттеу;

3) беріктігі жоғары алюминий-цирконий қорытпаларын термиялық өңдеудің оптимал режимдерін әзірлеу;

Жұмыстың өзектілігі: фазалық диаграммаларды эксперименттік құру айтарлықтай материалдық шығындар мен уақытты қажет етеді. Қо рытпалар мен функционалды материалдардың құрамы алуан түрлі және күрделі болады, олар жұмыс істеуі керек жағдайлар ауқымы кеңейеді, бұл зерттеу шығындарының бірнеше есе өсуіне әкеледі. Осыған байла нысты фазалық өзгерістерді теориялық зерттеу және көп компонентті

системалардың фазалық диаграммаларын есептеу әдістерін жасау аса маңызды болып табылады. Фазалардың пайда болу табиғатын және фазалық өзгерістердің ерекшеліктерін зерттеу, сонымен қатар қорытпалардың фазалық құрамы мен құрылымын сапалық және сандық бағалау әдістерін табудың қолданбалық маңызы зор.

1. Ғылыми – технологиялық проблемаларға шолу

1.1 Алюминий қорытпаларының құрылысы мен фазалық құрамы

Алюминий ақ -күміс түсті металл, 660 °С кристалданады. 20°С кезінде $a = 0,40496$ нм кезеңімен полиморфты айналулар жоқ, БШК торы бар. Алюминий таза тығыздығы $2,69 \text{ г / см}^3$ (20°С) [1].

Алюминий тығыздығы аз, жылу өткізгіштігі жақсы, электр өткізгіш , жақсы иілгіштікке және коррозияға төзімділікке ие. Қоспалар алюминийдің осы қасиеттерін нашарлатады.

Алюминий құймасынан құйылған бөлшектерді пайдаланудың болашағы заманауи материалдар мен пішінді құю өндірісінің технологияларын қолдану болып табылады. [2-6]

Құйылмадағы түйіршіктерді ұсақтау міндеті қорытпаны модификациялау арқылы жүзеге асады. Алюминий мен оның қорытпалары үшін ең мықты модификаторлар бор және титан болып табылады, оларды енгізу әсері олардың балқымадағы төмен концентрацияларында да байқалады (проценттің оннан бір бөлігі бойынша). Соңғы жылдары күшті модификаторларға цирконий жатады, бұл ірі тонналық өндіріс процесінде цирконийді алудың тиімді технологияларын, сондай-ақ оның әртүрлі қосылыстарын ала отырып, түсті металлургияның қалдықтары мен өнеркәсіптік өнімдерінен өндірудің тиімді технологияларын дамыту арқасында мүмкін болды.

Физика-химиялық қасиеттердің қолайлы кешені цирконийді түсті металдар қорытпаларының болашағы бар легірлеуші компоненті етеді. Осылайша, 0,02-0,05% (салмағы бойынша) цирконий алюминийдің шекті беріктігін 3 еседен астам арттырады және 300 ° С дейін қыздырғанда қасиеттердің жоғары тұрақтылығын қамтамасыз етеді.

1-кестеде алюминий және кейбір металдардың физикалық қасиеттері келтірілген.

1 Кесте – Металдардың физикалық қасиеттері

Қасиеттері ¹	Al	Zr	Mn	Cu
1	2	3	4	5
Кристалдық торы	БЦК	ГПУ	КЦК 1	БШК
Балқу температурасы, °С	660,37	1855	1244	1083,4

Полиморфты өзгеріс ² , °С	-	862 (ОШК)	727 (Кубтық II) 1095 (БЦК) 1133 (КЦК)	-
Қайнау температура, °С	2494	4377	2119	2567
Тығыздығы, г/см ³	2,69 8	6,506	7,47	8,92
Термиялық кеңею коэффициенті, 10 ⁶ ·К ⁻¹	23,5	5,8	22	
Меншікті электркедергісі, 10 ⁸ Ом·м	2,67	42,4	258	1,7
Жылуөткізгіштік, Вт·м ⁻¹ ·К ⁻¹	238	22,7	157	401
Балқу жылуы, Дж·г ⁻¹	405	267	220	210
Булану жылуы, кДж·г ⁻¹	10,8	3,99	6,4	4,9
Жылу сыйымдылық, кДж·кг ⁻¹ ·К ⁻¹	0,90	0,39	0,01	0,4
Серпімділік модулі, ГПа	70	198	97	125
Ескерту – Бөлме температурасында ¹ ; Қыздыру кезінде ²				

Температураның жоғарылауымен алюминийдің тығыздығы төмендейді және балқу температурасында қатты фаза үшін 2,550 г/см³ және балқыма үшін 2,368 г/см³ құрайды. Температураның жоғарылауымен жылу өткізгіштігі (λ) азаяды. Атап айтқанда, тазалығы 99,95% алюминий үшін 22°C кезінде $\lambda = 221,5$ Вт (м·К), ал 647 °С кезінде $\lambda = 184,5$ Вт (м·К). Алюминийдің сызықтық кеңеюінің (α) температуралық коэффициенті температураның жоғарылауымен артады: 27°C кезінде $\alpha = 23,3 \cdot 10^6$ К⁻¹, $\alpha =$ ал 227 °С кезінде $26,8 \cdot 10^6$ К⁻¹ және 427 °С кезінде $\alpha = 30,6 \cdot 10^6$ К⁻¹.

Алюминийдің механикалық қасиеттері тазалық дәрежесіне, оны өңдеу түрі мен режимдеріне, температураға, жай-күйіне және басқа да факторларға байланысты. Тазалық дәрежесі өсуімен алюминий қаттылығы азаяды, ал икемділік өседі. 20°C кезінде серпімділік модулі таза 99,25% металл үшін

69,65 ГПа, ал электролиттік тазартылған 99,98% алюминий үшін тазалығы - 65,71 ГПа құрайды. Температураның жоғарылауымен алюминий беріктігі төмендейді, ал икемділік өседі. 2-кестеде алюминийдің 20°C кезінде оның механикалық қасиеттерінің тазалық дәрежесіне тәуелділігі келтірілген. Қоспалардың көбеюі және пластикалық деформация алюминийдің беріктігі мен қаттылығы сияқты механикалық қасиеттерін арттырады [7].

2 Кесте - 20°C кезіндегі әр түрлі тазалықтағы алюминийдің механикалық қасиеттері

Тазалығы, %	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	НВ	δ , %
99,9	22	49	84-112	45,5
99,8	25	61	133	38,8
99,7	26	66	-	-
99,6	-	70	-	-
99,5	28	70	126-175	31,5

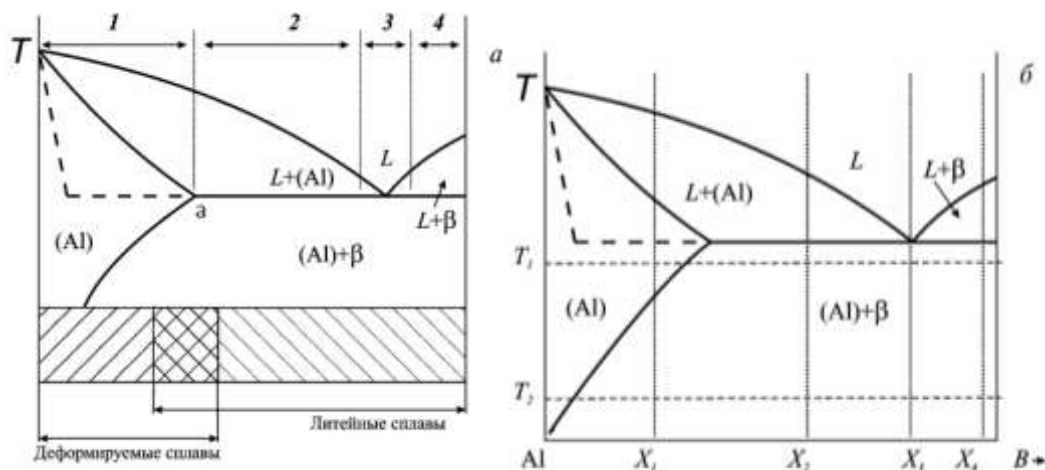
Тұрақты алюминийдің қоспалары – кремний, темір, мыс, титан, мырыш. Қоспалардың құрамына байланысты бастапқы алюминий үш класқа бөлінеді: ерекше таза А999 (0,001% қоспалар), жоғары таза А995, А99, А97, А95 (0,005 – 0,05% қоспалар) және техникалық таза А85, А8 және т.б. (0,15 – 1% қоспалар). Алюминийдің механикалық қасиеттері оның тазалығы мен күйіне байланысты. Қоспалардың мөлшерін арттыру және пластикалық деформация алюминий беріктігі мен қаттылығын арттырады. [8]

Кристалдану кезінде алюминий үлкен шөгуге ие (6%). Жоғары балқу жылуы және жылу сыйымдылығы алюминийдің сұйық күйден баяу суығуына ықпал етеді, бұл модификациялау, тазарту және басқа да технологиялық операциялар арқылы алюминийден және оның қорытпаларынан құймаларының сапасын жақсартуға мүмкіндік береді.

Агрессивті ортада және ауада алюминий жоғары коррозияға төзімділігімен ерекшеленеді. Өндіріс және тұтыну көлемі бойынша (жылына 22 млн.тоннадан астам) ол барлық түсті металдар арасында даусыз көшбасшы болып табылады.

Мақсаты бойынша өнеркәсіптік құймалар бөлінеді: құюға – негізінен силумин және деформацияланатын – негізінен дюралюминий. Құю қорытпалары фасонды құймаларды алуға арналған, олардың құрамдарының облысы схемалық түрде 1-суретте көрсетілген. Олар жақсы құю қасиеттеріне ие болуы керек: жоғары сұйыққақыштық және шашыраңқы шөгінді қуыстар мен кристаллизациялық жарықтардың пайда болуына бейімділігі аз. Деформацияланатын қорытпалардан жартылай үздіксіз құю әдісімен дөңгелек және тегіс құймалар алынады, олар қысыммен ыстық және суық күйінде өңдеуге

ұшырайды (илемдеу, нығыздау, қалыптау, соғу және т.б.), әр түрлі жартылай фабрикаттарды (плиталар, жаймалар, шыбықтар, құбырлар және т. б.) алады. Көптеген өнеркәсіптік деформацияланатын қорытпалар құрамдарының аумағы алюминийден а нүктесіне дейін созылады (1 Сурет).



1 Сурет – Эвтектикалық типті Al-B күй диаграммасының схемасы (B – легірлеуші компонент)

а - өнеркәсіптік алюминий қорытпалары құрамдарының аймақтары және олардың төрт топ бойынша жіктелуі; б – қарапайым қорытпалар мен термоөңдеу температураларының фигуративті түзуі.

Қазіргі уақытта қорытпаның орташа құрамын оңай бағалауға мүмкіндік беретін негізгі легірлеуші компоненттердің әріптік белгілері мен олардың концентрациясы бар стандартты құю қорытпаларын (алюминий ғана емес) белгілеудің бірыңғай жүйесі жұмыс істейді. МЕСТ 4784-97 сәйкес құйылмалы алюминий қорытпасының маркасы А әрпінен басталады, одан кейін легірлеуші компонентті білдіретін әріптер: К – Si, М – Cu, Мг – Mg, Ц – Zn, Н – Ni, Кд–Cd. Сандар элементті белгілегеннен кейін оның орташа мазмұнын көрсетеді. Егер элементтің концентрациясы 1,5% - дан аспайтын болса, онда оны белгілегеннен кейін сандар қойылмайды.

АҚШ-та құйылмалы алюминий қорытпаларын таңбалау үшін (және көптеген басқа елдерде) алюминий қауымдастығының үш таңбалы жүйесі қабылданды (әдетте марканың басында АА ағылшын әріптерін қояды). Нүкте мен (А, В, С және D) әрпінен кейін қосымша санның алдында базалық марканың модификациясын анықтайды. Бірінші С_{си} легірлеудің базалық жүйесін анықтайды: 4 – қос силуминдер, 3 – легірленген силуминдер, 2 – алюминий мыс силуминдер, 5 – магналиялар [9].

Өнеркәсіптік алюминий қорытпаларын белгілеудің басқа да жүйелері бар: ұлттық (мысалы, Германияда DIN), шетелдік компанияның ресейлік ТУ немесе ішкі стандарты бойынша. Олардың арасында *Federal – Modul Corpora*

tion Powertrain Systems компаниясының FM поршеньді силуминдерінің белгіленуін атап өткен жөн. [10]

Сонымен қатар, стандарттағылардан басқа, қолданылуы шектеулі жаңа өнеркәсіптік қорытпалар көп екенін атап өткен жөн, олардың таңбалануы өте ерекше болуы мүмкін.

Алюминий қорытпалары, әдетте, құрамында бірнеше элементтер мен қоспалар бар, [10] олардың құрылымның әр түрлі параметрлеріне әсері 3-кестеде көрсетілген.

3 Кесте – Өнеркәсіптік алюминий қорытпаларындағы қоспаларды олардың құрылымның әр түрлі элементтеріне әсері бойынша жіктеу [10].

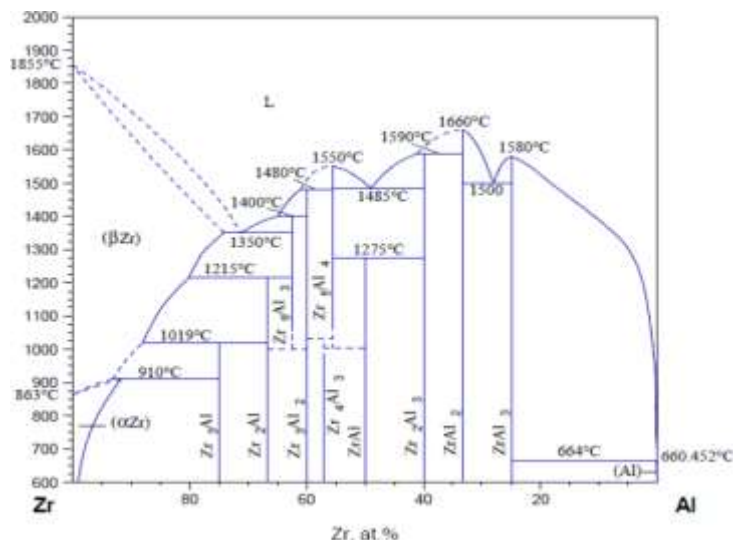
Құрылым элементтері	Легірлеуші элементтер және қоспалар
Қатты күйінде еритін легірлеуші және ескіру кезінде тұрақты фазалардың пайда болуы	Cu, Mg, Si, Zn, Li, Mn
Ерімейтін эвтектикалық фазалардың түзілуі (қыздырып өңдеу кезінде)	Fe, Ni, Mn, Mg, Si, Cu, Be
Бастапқы кристалдардың пайда болуы	Fe, Ni, Mn, Si, Zr, Cr, Ti
Қыздырып өңдеу кезінде дисперсоидтардың пайда болуы	Mn, Zr, Cr, Ti, Sc, (Si, Cu)
Фазалық құрамға аз әсер ететін микро қосындылар	Be, Cd, Sr, Na, Ti, B
Ескерту: - ¹ Бір элемент қорытпадағы мөлшері мен құрамына байланысты әртүрлі болып жіктелуі мүмкін.	

Көп мөлшерде негізгі легірлеуші элементтерді енгізу мүмкін болады. Себебі олардың қатты күйінде алюминидегі еру шегі жоғары [10].

Тазалығы жоғары қарапайым өнеркәсіптік қорытпалардың фазалық құрамы мен құрылысын екі компонентті фазалық диаграммалардың көмегімен талдауға болады. Ал көп компонентті, құрамында әртүрлі легірлеуші элементтер мен қоспалар бар қорытпалардың фазалық құрамы мен құрылысын талдау үшін көп компонентті системалардың диаграммаларын пайдалану керек болады. [53]

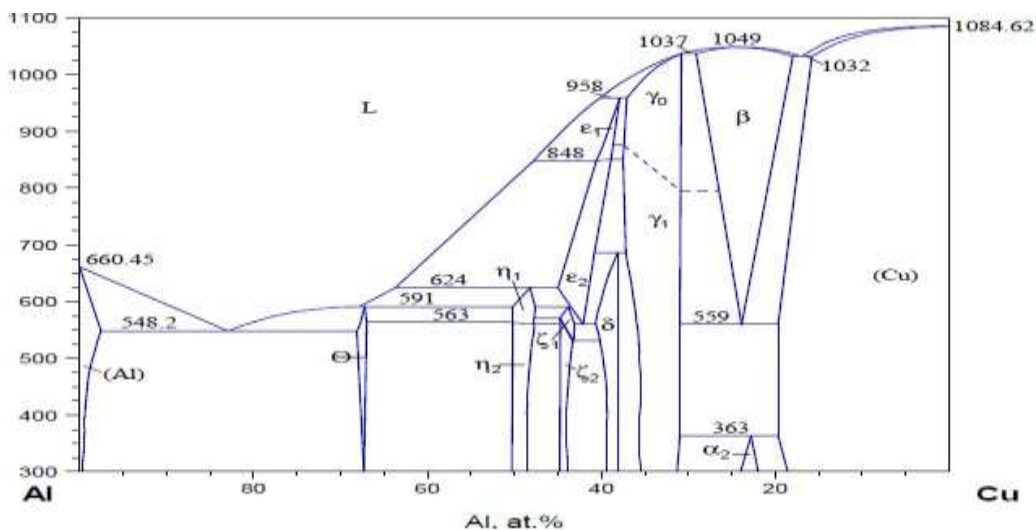
Al-Zr системасында бірнеше химиялық қосылыстар түзіледі. Al₃Zr қосылысының балқу температурасы 1578 °C, тетрагональды текше торы параметрлері $a = 0,4014$ нм, $c = 0,1734$ нм. Бұл фазаның бастапқы кристалдары алюминий матрицасының (Al) фонындағы инелер болып табылады. Тез суытқанда Al – Zr қорытпалары тез кристалданады. Нәтижесінде алюминий негізіндегі қатты ертіндінің концентрациялық аймағы кеңейіп, құрамында

сұйық фазадан бөлінетін алғашқы цирконий кристалдары жоқ құрылым алуға мүмкіндік туады. [53]



2 Сурет – Al – Zr системасының фазалық күй диаграммасы [53]

Al_3Zr фазасы қаныққан қатты ерітіндіден бөлінгенде $a = 0,405$ нм параметрі бар кубтық тормен аралық фаза болады. Біріншіден, ол дөңгелектенген бөлшектер түрінде, содан кейін желдеткіш тәрізді таралуы бар өзекшелер түрінде бөлінеді. Соңында төрт бірлік ұяшық бір Al_3Zr ұяшығына айналады. Бұл диаграммадағы келесі кезең — Al_2Zr , ол $1485^\circ C$ температурада Al_3Zr фазасымен эвтектиканы құрайды [11]. Бұл диаграмма мен классикалық анықтамалықтарда келтірілген сызбалар арасында айтарлықтай айырмашылықтар жоқ [12]. Перитектикалық реакция температурасында шамалы сәйкессіздік бар. Алюминий жағынан $L - Al + Al_2Cu$ эвтектикасы $548,2^\circ C$ -та қалыптасды. (3 Сурет)



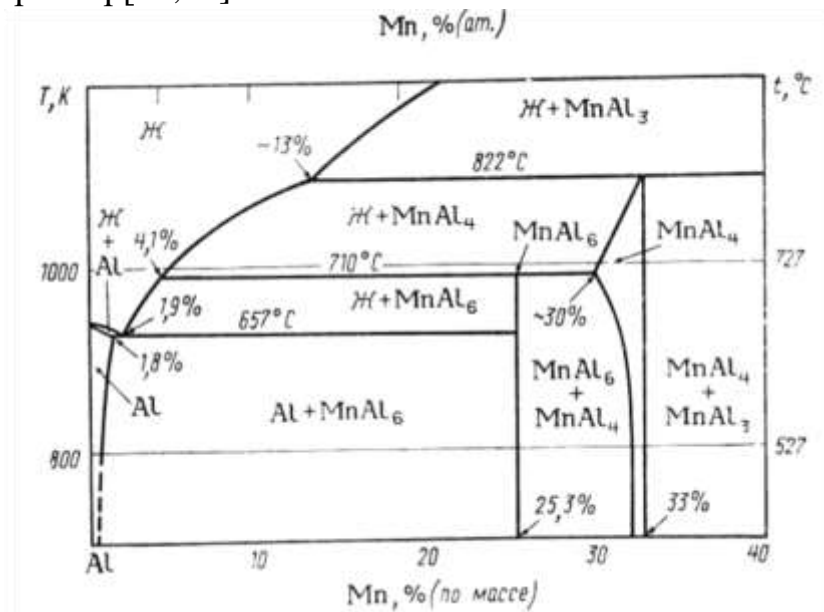
3 Сурет – Al – Cu системасының фазалық күй диаграммасы [53]

Тұрақты химиялық қосылыс Al_2Cu балқымадан тікелей 53,3% Cu және $591^\circ C$ кристалданады. Al_2Cu фазасында параметрлері $a = 0,6066$ нм, $c = 0,4874$ нм болатын тетрагональды торы бар. Al_2Cu фазасының бөлшектері дөңгеленген пішінге ие және біркелкі таралған. Қорытпаның беріктігі негізінен бөлшектер арасындағы орташа қашықтыққа байланысты [12,53].

$Al - Mn$ тепе-теңдік фазасының диаграммасы 4-суретте көрсетілген. $Al + Al_6Mn$ эвтектикасы $658^\circ C$ температурада $\sim 1,9\%$ Mn концентрациясында түзіледі. Баяу суытқан кезде эвтектика плиталар, инелер немесе рамалар түрінде пайда болатын жетекші фаза ретінде Al_6Mn қосылысы бар ерекше құрылымға ие болады. Эвтектикалық сұйықтықтағы марганецтің мөлшері $1,9\%$ сәйкес келеді, алалюминий матрицасында марганецтің шекті ерігіштігі $1,4\%$ құрайды. Al_6Mn фазасы $L + Al_4Mn \rightarrow Al_6Mn$ перитектикалық өзгеріс нәтижесінде $710^\circ C$ -та қалыптасады [12,53].

Al_6Mn фазасы алюминиймен тепе-теңдікте, параметрлері $a = 0,65$ нм, $b = 0,757$ нм, $c = 0,886$ нм болатын орторомбалық торы бар (кеңістік тобы $Cmcm$, бір ұяшыққа 28 атом).

Al_4Mn фазасының параметрлері $a = 0,284$ нм, $c = 0,124$ нм болатын алты бұрышты торы бар [12,53].



4 Сурет. $Al - Mn$ системасының фазалық күй диаграммасы [53]

Өтпелі металдан жасалған қоспалар беріктендіруден басқа, көбінесе түйіршікті ұсақтау арқылы қорытпалардың өңделу қабілетін жақсартады. Цирконий бұл жағынан әсіресе тиімді. Сондай-ақ, цирконийді қосу коррозияның әртүрлі түрлеріне төзімділікті арттырады. Тізімдегі қоспалардың оң әсеріне тек технологияны қатаң сақтаған кезде ғана жетуге болатындығын ескеру қажет. Әйтпесе, олардың қорытпада болуы пайдасыз, тіпті зиянды болуы мүмкін. Мысалы, егер осы қоспа қосылған балқыманың температурасы,

әдетте, негізгі қорытпадан тым төмен болса, онда құймалардың құрылымында механикалық қасиеттерді төмендететін ірі бастапқы алюминидтер болуы мүмкін. Бұл алюминий жағында перитектикалық типке жататын және сұйықтық температурасының күрт өсуімен сипатталатын екі фазалы диаграммалардан туындайды [10].

Қорытпалардың құрамына кіретін элементтердің соңғы тобы қоспалар болып табылады, олар шикіқұрам материалдарынан, атап айтқанда техникалық тазалықтағы бастапқы алюминийден, сондай-ақ балқыту процесінде (тигельдерден, құрал-саймандардан, кездейсоқ ластанулардан) түсуі мүмкін. Әсіресе зиянды темір мен кремний (олар легирлеуші элементтер емес), негізінен қолайсыз морфологиясы бар кристалдану фазаларының пайда болуына байланысты, механикалық қасиеттерді, әсіресе икемділікті, сыну тұтқырлығын және шаршауға төзімділікті айтарлықтай төмендетеді.[1]

1.2 Алюминий қорытпаларындағы легирлеуші элементтердің өзара әрекеттесу ерекшеліктері

Классикалық өткізгіш қорытпаларының негізгі проблемасы - олардың жылу төзімділігі жеткіліксіз. Қайта кристалданудың басталу температурасын жоғарылатудың мүмкін әдістерінің бірі қосымша легирлеу болып табылады (атап айтқанда, ауыспалы металдармен). [13] Олардың алюминиймен өзара әрекеттесуінің ерекшеліктері төменде қарастырылады.

Өтпелі металдардың (ӨМ) алюминий қорытпаларының құрылымы мен қасиеттеріне әсер ету заңдылықтары барлық ӨМ-ны негізгі үш класқа бөлуге мүмкіндік береді:

1. d-қабықшасында 1-2 электрон (Sc, Ti, Zr) бар элементтердің периодтық жүйесінің III және IV топтарының ӨМ. Осы кластың барлық ӨМ алюминий қорытпаларының құрылымын тиімді модификаторлар болып табылады;

2. d^2 , d^3 , d^4 , d^5 атомдарының электрондық конфигурациялары бар IV, V, VI және VII топтардың ӨМ. Бұл өтпелі металдардың ең үлкен класы (Zr, V, Cr, Mn, Mo, W және т.б.). Кристалдану кезінде олар алюминийде жеткілікті тұрақты қаныққан қатты ерітінділер түзеді. Қатты ерітінділердің ыдырау өнімдері деформацияланған жартылай фабрикаттардың механикалық, коррозиялық және басқа қасиеттеріне жақсы әсер етеді;

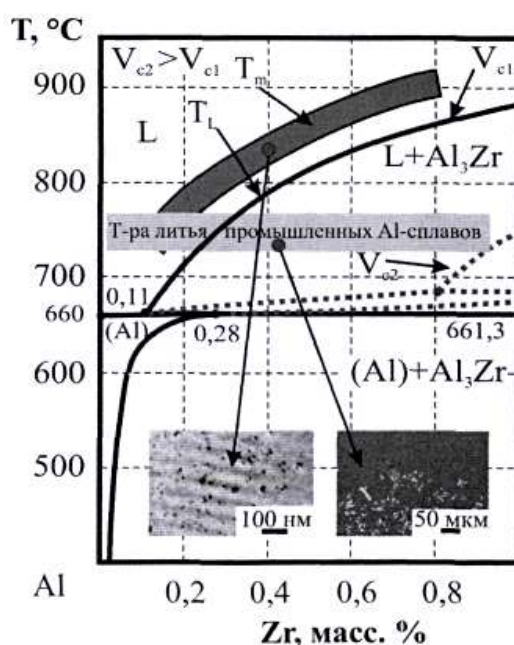
3. d^6 , d^7 , d^8 атомдарының электрондық конфигурацияларымен бар VIII топтағы ӨМ. Бұл Fe, Co, Ni және олардың V және VI периодтардағы аналогтары [14].

Өндірістік алюминий қорытпаларының құрамдарын талдаудан [15] мыналардан шығады: қайта кристалдану температурасын жоғарылататын ең

эмбебап ұсақ қоспалар көптеген өндірістік қорытпалардың құрамына кіретін марганец пен цирконий болып табылады.

Бұл элементтерді енгізудің негізгі мақсаты - қорытпалардың қосымша қатаюы, оның ішінде деформацияның беріктенуін сақтау, ыстыққа төзімділік пен кернеудің коррозиясы жоғарылайды. Бұған фазалық диаграмманың мета тұрақты нұсқасына сәйкес аномальды қаныққан қатты ерітінділердің пайда болуының арқасында қол жеткізіледі. [14, 16] Кейінгі технологиялық қыздыру кезінде бұл ерітінділер ыдырайды, ал пайда болған ӨМ екінші реттік алюминидтері өздері беріктенуге ықпал етеді.

Беріктендіруден басқа, ӨМ қоспалары көбінесе түйіршіктерді ұсақтау арқылы қорытпалардың технологиялылығын жақсартады [16, 17]. Титан (бо рмен бірге және бөлек) және цирконий бұл тұрғыда әсіресе тиімді. Бұл ретте аталған қоспалардың оң әсеріне оларды балқымаға енгізу технологиясын қатаң сақтаған жағдайда ғана қол жеткізуге болатындығын міндетті түрде ескеру керек [18]. Әйтпесе, олардың қорытпада болуы пайдасыз және тіпті зиянды болуы мүмкін. Мысалы, егер әдетте лигатурадан енгізілген осы қоспалармен балқыманың температурасы тым төмен болса, онда құймалардың құрылымында ірі бастапқы алюминидер болуы мүмкін. Бұл әсіресе цирконий қоспасы бар қорытпаларға қатысты [14, 16]. Бұл алюминий жағында перитектикалық түрге ие және ликвидустың күрт өсуімен сипатталатын Al-Zr қос фазалы диаграммаларынан шығады. (5 Сурет)



5 Сурет – Цирконий қосылған алюминий қорытпаларының құрылысының құю температурасы мен суыту жылдамдығына байланысты қалыптасуы

5-суреттен көрініп тұрғандай, әрдайым (оның ішінде өте тез кристалдану кезінде) $T_M > T_L$ шарттары орындалуы керек (қажетті қызып кетуді ескере отырып, кем дегенде $30\text{ }^\circ\text{C}$, $T_M > T_L + 30$ ұсынуға болады). Әйтпесе, Al_3Zr бастапқы кристалдары балқымада құю басталғанға дейін болады, демек құймаға өтеді.

Қалыпты құю жағдайында, егер ΘM мөлшері шекті ерігіштіктен асып кетсе, онда интерметаллдік қосылыстардың ірі кристалдары тұнбаға түседі, бұл кейбір жағдайларда механикалық қасиеттердің нашарлауына әкелуі мүмкін. Құрамында біріншілік интерметаллдар бар қорытпалардың кристалдану жылдамдығының жоғарылауы қаныққан қатты ерітінділердің түзілуіне ықпал етеді [11,14].

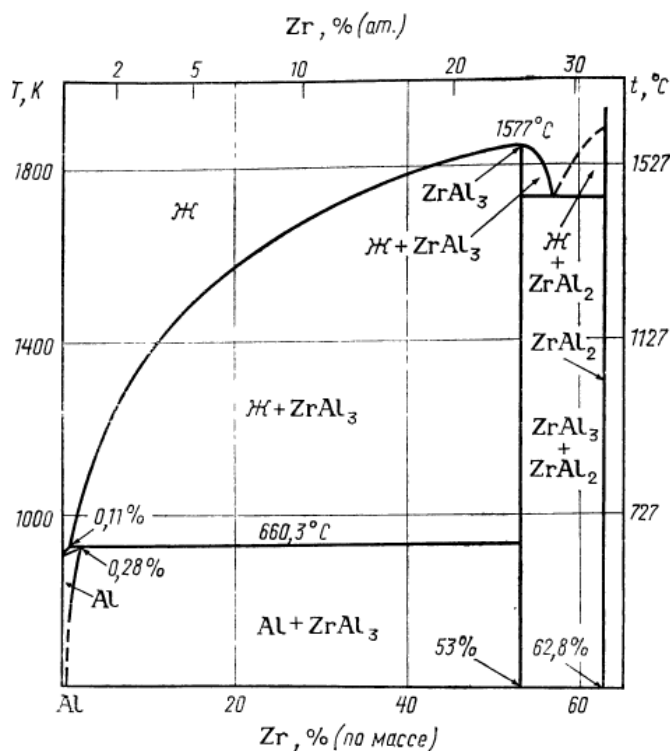
Қаныққан ΘM қатты ерітіндісінің ерекшелігі-қанықтылық бөлме температурасында ғана емес, сонымен қатар стандартты қорытпалар гомогенизацияланатын $450\text{-}550\text{ }^\circ\text{C}$ дейінгі температурада да сақталады. Мұндай температурада ΘM ерігіштігі өте аз болғандықтан, гомогенизациялық қыздыру кезінде кристалдану кезінде пайда болған қаныққан қатты ерітіндінің ыдырау өнімі болып табылатын интерметаллдіктердің шығарылуы мүмкін. Гомогенизация температурасында негізгі легірлеуші компоненттердің ерігіштігі өте жоғары, сондықтан осы температурада ұстау кезінде негізгі фазалар ериді [19]. ΘM алюминидтерінің дисперсті бөлшектері көп жағдайда біртектес құймалардан алынған деформацияланған жартылай фабрикаттардың қайта кристалдануының басталу температурасын жоғарылатады [20]. Дислокацияны бекітетін интерметаллдық бөлшектер, оларды қайта кристалдану орталықтарын қалыптастыру үшін қажет қыздыру кезінде олардың қайта бөлінуіне жол бермейді және сол арқылы қайта кристалдану температурасының жоғарылауын тудырады. Осы интерметаллдық қосылыстардың оңтайлы дисперсиясы кезінде кейбір жартылай фабрикаттардың қайта кристалдану температурасы соңғы термиялық өңдеу температурасынан жоғары болуы мүмкін. Бұл жағдайда қайта кристалданбаған (полигонизацияланған) құрылым дайын өнімде қалады (термиялық өңдеуден кейін), бұл беріктіктің едәуір жоғарылауын тудырады [13].

Алюминийдің қатты ерітіндісін күшейтудің басты факторы оның кристалдық торының бұрмалану дәрежесі мен сипаты екендігі белгілі [11]. Кристалдық тордың бұрмалану дәрежесі алюминий мен легірлеуші элементтің атомдық диаметрлері арасындағы айырмашылыққа байланысты: элементтің атомдық диаметрі неғұрлым көп болса, соғұрлым ол алюминийдің кристалдық торын бұрмалайды. Магний мен цирконийді (атомдық диаметрі үлкен) алюминийге енгізген кезде қатты ерітіндінің торлы параметрі жоғарылайды. Қарама-қарсы әсер мырыш, мыс, кремний сияқты

легірлеуші қоспаларды енгізу кезінде байқалады. Қоспалы металдармен қорытпалардың қорытпаларының айқын артықшылықтарына қарамастан, марганецтің, цирконийдің, ванадийдің, хром мен титанның маңызды кемшілігі алюминийдің электрлік кедергісінің едәуір жоғарылауы болып табылады. Алайда, цирконийдің алюминийдің жылуға төзімділігін арттыратын ең тиімді элементтердің бірі ретіндегі қасиеттері жаңа материалдарды, соның ішінде өткізгіштерге арналған материалдарда кеңінен қолданылады [21].

1.3 Қорытпалардың құрылысы мен қасиеттеріне цирконийдің әсері.

Al-Zr жүйесінің алюминий бұрышының жанындағы тепе-теңдік күйінің перитектикалық диаграммасы типтегі диаграмма болып табылады. Алюминийге бай аймақта перитектика реакциясы жүреді, онда 0,11% Zr бар $ZrAl_3$ қосындысымен әрекеттесіп, алюминийдің қатты ерітіндісін құрайды. Ең ықтимал нонвариантты температура 664 С емес, 660 С. Перитектикалық көлденеңнің температурасы 660,5 ° С құрайды. Цирконий алюминий матрицасында аздап ерігіштігімен ерекшеленеді, сондықтан перитектикалық температурада алюминийдегі цирконийдің шекті ерігіштігі 0,28% құрайды, ол температураның төмендеуімен күрт төмендейді.



6 Сурет. Al-Zr системасының фазалық күй диаграммасы [22]

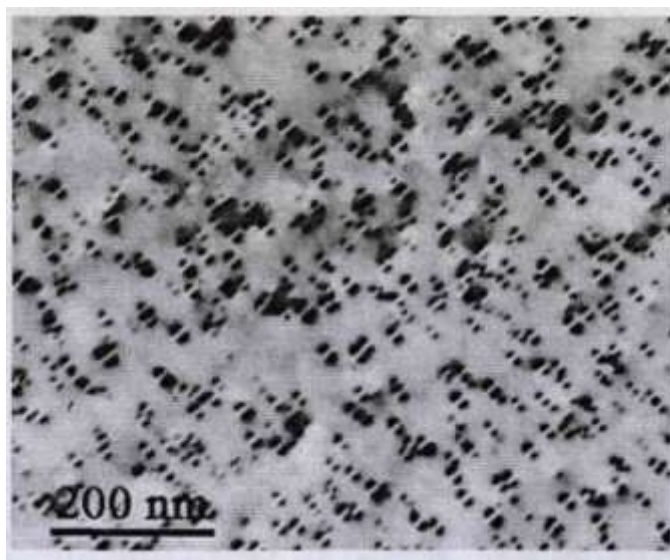
Құрылымға цирконийдің әсер етуі ерекшеліктері ішіндегі мыналарды бөлініп көрсету керек:

1 цирконий қосындысы бар қорытпалардың сұйықтық температурасы жоғары (5 Сурет);

2 алюминийде циркония диффузиясының салыстырмалы түрде төмен коэффициенті;

3 циркониймен қаныққан қатты ерітіндінің ыдырауы Al_3Zr метастұрақты фазалық бөлшектердің когерентті алюминий матрицасының бөлінуімен жүреді. [23].

Қаныққан қатты ерітіндінің ыдырауы пайда болу (зарождение) сатысы мен жаңа фаза бөлшектерінің өсу сатысынан тұрады. Қорытпаның құрамында 0,1% - дан астам Zr болған кезде, басқа қоспалаушы элементтердің құрамына қарамастан, гетерогенизациялық күйдіру кезінде диаметрі шамамен 10 нм сфералық пішіндегі дисперсті екінші реттік бөліністер пайда болады. Екінші реттік бөліністер қарапайым кубтық торлы және периоды 0,408 нм болатын метастұрақты фазаның бөлшектері ретінде анықталады. Бөліністер матрицаға сәйкес келеді, бұған электронды микроскопиялық кескіндердегі контраст табиғаты дәлел болады және бұл когеренттілік максималды температурадағы ең ұзақ экспозициялар кезінде де сақталады (7 Сурет).



7 Сурет - Al_3Zr фазасының екінші реттік бөліністері[53]

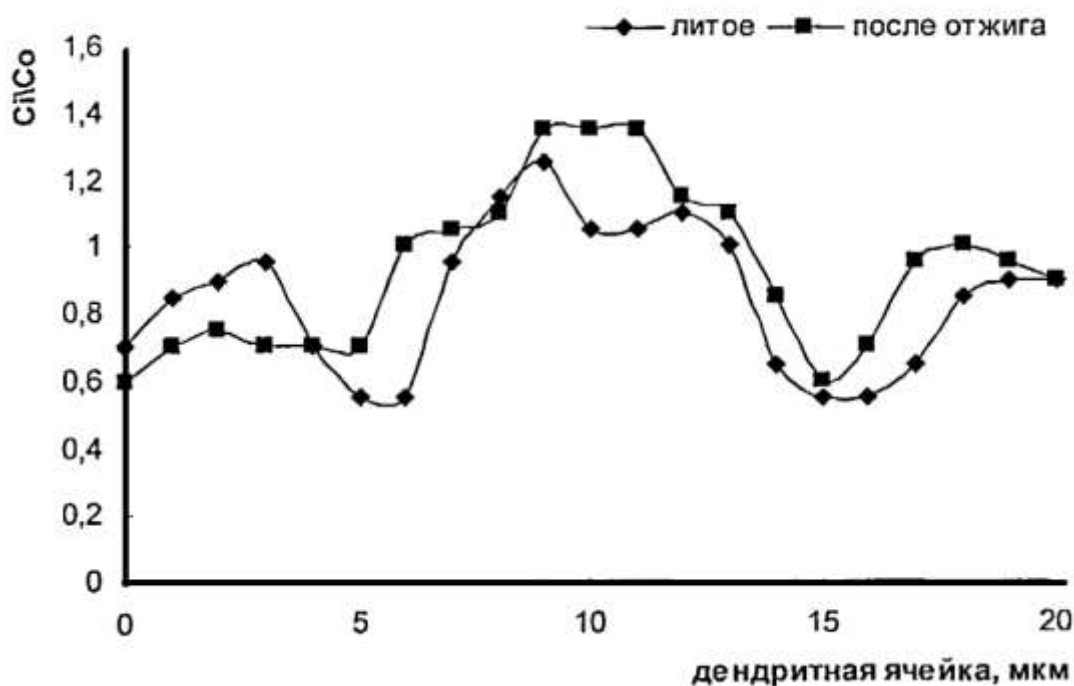
450°C-тан жоғары температурада метастабильді модификациядан тұрақтыға ауыса отырып, Al_3Zr бөлшектері кесілуі мүмкін. Al_3Zr фазасының диспероидтарынан қатаю тиімділігі олардың мөлшеріне, таралуына және олардың арасындағы қашықтыққа байланысты. Максималды беріктігі бар күйде бөлшектердің мөлшері әдетте 10-20 нм-ден аспайды [24,25].

Al_3Zr фазасының бөліністерінің бөлінуімен алюминийдің қатты ерітіндісінің процесі ыдырау 1,5% шейін Zr бар алюминий қорытпаларында электронды микроскопияны қолдану арқылы жақсы зерттелген. Осы концентрацияға дейін цирконий алюминийдің қатты ерітіндісіне толықтайынан ене алады. Кристалдану процесінде жоғары концентрацияда Al_3Zr фаза сының тұрақты модификациясының (DO_{23}) бастапқы ірі алюминийі түзіледі.

Al_3Zr метатұрақты фазасының күшті беріктендіргіш болып табылатын бөлінуі бір фазалы және екі фазалы ыдырау нәтижесінде пайда болуы мүмкін. Басқа өтпенді металдар болған кезде (марганец, хром, никель және басқасы) алюминий ерітіндісінің ыдырау сипаттамасы түбегейлі өзгермейді.

Цирконийдің алюминийдегі диффузиялық белсенділігінің күшті ба сылуына байланысты қорытпаларда құрамындағы күшті ликвация байқалады [23], ол күйдіргеннен кейін де жойылмайды (8 Сурет), бұл дендритті ұяшықтардың көлденең қимасы бойынша бөліністердің біркелкі таралуына әкеледі.

Ликвидустың жоғары болуы цирконий қосылған алюминий қорытпала рының балқу және құю температурасының жоғарылауын анықтайды. Құю температурасының ликвидтен төмен төмендеуі Al_3Zr фазасының бастапқы кристалдарының пайда болуына әкелуі мүмкін, осылайша алюминий қатты ерітіндідегі цирконийдің концентрациясын төмендетеді және кейінгі дисперсиялық қаттылықтың әсерін азайтады.



8 Сурет - Қорытпаларды құю және қыздырып өңдеу кезінде цирконийдің дендриттік ұяшықтың көлденең қимасы бойынша таралуы[23]

Жоғарыда айтылғандай, ол ыстықтай және суықтай деформацияланған соң қорытпалардың мен алюминий қайта кристалдану температурасын кенет көтереді, нәтижесінде термиялық өңделген күйде кристалданбаған немесе ішінара кристалданбаған құрылымды, сондықтан механикалық қасиеттерді жоғарылату мүмкіндігі пайда болады [26].

Цирконий алюминий мен кейбір алюминийлі қорытпаларының коррозияға төзімділіктің айтарлықтай жақсартады. [27] Марганец пен хром қоспаларынан айырмашылығы, цирконий кейбір алюминийлі қорытпаларыда қатты ерітіндінің тұрақтылығын арттырылады, бұл осы қорытпалардың жартылай фабрикаттардың ыстыққа төзімділігінің артуына алып келеді [28]

Цирконий қоспасының беріктендіру әсері икемділіктің аздап төмендеуімен бірге жүреді [29].

Цирконияға ұқсас ыдырауын үлгісі скандий қосындысы бар құймалары алюминий қорытпаларының мен құймаларын гомогенизациялау уақытында пайда байқалады [30-33]. Скандийдің ерекшелігі - оның алюминийде аномальды қаныққан қатты ерітіндісін кристалдану кезінде салыстырмалы түрде төмен салқындату жылдамдығында түзуге қабілеттілігі. [28]

Цирконийдің құрылымы мен қасиеттеріне әсерін анықтайтын алюминийдегі ерігіштігі, көп компонентті қорытпаларда әр түрлі болуы мүмкін, бұл цирконийдің басқа қорытпа компоненттерімен әрекеттесу сипатына байланысты.

2 Зерттеу әдістемелері

2.1 Қорытпалар мен үлгілерді зерттеуге дайындау

Зерттеудің негізгі объектілері - зертханалық және өндірістік жағдайда алынған, құрамында цирконий бар, тәжірибелік алюминий қорытпаларының құйма дайындамалары болып табылады. Тәжірибелік қорытпалар электр кедергілі пеште графит-шамот тигельінде таза компоненттермен (Al, Cu, Mn) және Al-1% Zr лигатурасын қосып балқыту арқылы дайындалды. Қоспалардың жалпы шамасы 0,1% - тен аспайды. Құйма дайындамалар сұйық металды графитті қалыпқа құю арқылы алынды. Олардың өлшемдері негізінен 10x40x200 мм және 40x120x200 мм болды. Құймалар зерттеу алында муфельді электр пеште термиялық қыздырып өңдеуден өткізіледі. Өртүрлі температурада қыздырып өңделген дайындамалар пеште және ауада өртүрлі жылдамдықпен суытылады. Құрылымдық зерттеулер электронды микроскопия әдісімен жүргізілді.

2.2 Қорытпалардың механикалық қасиеттерін анықтау.

Графитті қалыптарда кристалданған 10x40x200 мм құймалар үш нүктелі иілу схемасы бойынша ИР5057 – 50 әмбебап сынақ машинасында кез-келген кесу өңдеусіз сыналды: жүктеме тіректер арасындағы қашықтықтың ортасында шоғырланған күшпен қолданылды. Бұл қашықтық 120 мм болды. Жүктеме жылдамдығы 4 мм/мин болды, иілу беріктігі (UBS) және иілу бұрышы (α) анықталды. Бұл сипаттамалар стандартты созылу қасиеттерімен жоғары корреляцияға ие ($UBS \approx 1,7 * UTS$, МПа және α (град.) $\approx 4 * E_l$, %). Сондықтан, механикалық сынаудың бастапқы кезеңінде бұл техниканы қолдану жарылыс үлгілерінің қымбат сынауларымен салыстырғанда экономикалық тұрғыдан тиімді.

Таңдалған қорытпалар стандартты созылу сынақтарына (UTS, YS, El) және соққы тұтқырлығына (KCU) ұшырады. Бір осьті созылуға арналған сынақтар (MEMCT 1497-84) диаметрі 6 мм стандартты 5 еселік цилиндрлік үлгілерде 2 мм/мин жүктеу жылдамдығы кезінде ИР5057–50 әмбебап сынақ машинасында жүргізілді. Соққы тұтқырлығын (KCU) анықтау үшін MEMCT 9454-78 бойынша маятникті копрда сынақтар жүргізілді.

2.2.1 Микроқаттылықты өлшеу

Құрылымдық компоненттердің микроқаттылығы ПМТ–3М құрылғысында 20 г жүктеме кезінде анықталды, құмдар МРС-ны зерттеу

үшін механикалық жылтыратумен, сондай-ақ сканерлеуші электронды микроскоптағы микроқаттылықты анықтау және құрылымды егжей-тегжейлі талдау үшін электролиттік жылтыратумен дайындалды.

Микроқаттылықты өлшеуші ПМТ-3М өлшеуге арналған материалдардың, қорытпалардың, шынының, керамика мен минералдардың микроқаттылығын төрт қырлы пирамиданың шаршы негізімен Виккерстің алмас ұшының сыналатын материалға басу әдісімен, жүктеменің әсерінен индентордың тереңдеуіне қарай іздердің геометриялық және механикалық ұқсастығын қамтамасыз етеді.

Микровердомердің жұмыс істеу принципі алмазды ұштықты (пирамиданы) зерттелетін материалға белгілі бір жүктеме астында басуға және алынған таңбаның диагоналінің сызықтық шамасын өлшеуге негізделген. Микроқаттылықтың саны алмас ұштығына қолданылатын қалыпты жүктемені бөлу арқылы анықталады.



9 Сурет – Микроқаттылықты өлшеуші ПМТ-3М

2.2.2 Бринелл қаттылығын өлшеу

Бұл жұмыста Бринелл қаттылығының стандартты өлшемдері қолданылды. Құймалардағы қаттылық МЕМСТ 9012-59 сәйкес БРИНЕЛЛ ТБ – 5004 қатты өлшегішінде анықталды (шардың диаметрі 5 мм, жүктеме 250 кгс, ұстау мерзімі 30 с).

2.3 Оптикалық және растрлық электронды микроскопия

Қорытпалардың құрылымы электронды сканерлеу микроскопында (JSM-6610LV) зерттелді.

Зерттеу нысандары термоөңделген құймалардың орталық бөлігінен кесілген шлифтер болып табылады. Шағылысқан электрондар мен екінші ретті электрондардың режимдері қолданылды. Шағылысқан электрондардың траекториясы түзу сызықты. Шағылысқан электрондардың саны объектінің зат элементтерінің атомдық санына байланысты. Зерттелген заттың атомдық саны неғұрлым жоғары болса, демек, атомдарда соғұрлым көп электрондар болады, ал жылдам электрондардың кері шашырауы неғұрлым қарқынды болса, бұл аймақтар соғұрлым жарқын көрінеді [64]. Осылайша, микроскоптың осы жұмыс режимінде максималды фазалық контрастқа қол жеткізіледі. Бұл $Al_3Zr (D0_{23})$ фазасының бастапқы кристалдарын анықтау кезінде оларды жарық микроскопында алынған құрылымды талдау қиын болған жағдайда анықтау өте маңызды. Екінші реттік электрондардың энергиясы аз (шамамен 10 эВ), сондықтан едәуір тереңдікте пайда болған екінші реттік электрондар иондалған атомдармен рекомбинацияланады. Екінші реттік электрондар шығару әсерін беретін объектінің тереңдігі 500 Å-ден төмен және диаметрі электрон зондының диаметрінен сәл ғана үлкен. Бұл жағдайда қайталама электронды кескіннің шағылыстырылған электронды кескінге қарағанда әлдеқайда жақсы ажыратымдылығы бар (100000 есе үлкейтуге дейін).

Сондай-ақ, зерттелетін қорытпалардың микроқұрылымы Leica+оптикалық микроскопында қарастырылды. Бұл микроскоп $\times 100$ -ден $\times 1000$ есеге дейін ұлғайған кезде металдар мен қорытпалардың фазалық құрамы мен құрылымдық ерекшеліктерін зерттеуге арналған. Жиілігі-50-60 Гц, кернеу-115 – 230 V, 50 VA. Компьютер: Қуаты - 50 Гц. Кернеу-220 V.

Фазалардың көлемдік үлестерінің (Q_V) мәндері көп компонентті жүйелерді талдаудан туындайтын белгілі заңдылықтарды қолдана отырып, эксперименттік және есептеу арқылы анықталды. Фазалар мен қорытпалардағы барлық компоненттердің концентрациясын біле отырып, массалық үлестің мәндерін есептеуге болады, ал олар бойынша фазалық тығыздықтың мәндерін қолдана отырып, Q_V бағалауға болады. Құрылымдық компоненттердің сызықтық өлшемдері ((Al) бастапқы кристалдар және эвтектика) жарық микроскопында эксперименталды түрде бағаланды.

2.4 Көп компонентті системалардың фазалық диаграммаларын компьютерлік есептеу әдісі

Thermo-Calc бағдарламасы тепе-теңдік жүйелерімен, яғни ішкі а уытқуларға және температура мен құрам сияқты бірқатар параметрлерге қа тысты тұрақты күйде болатын классикалық термодинамиканың моделіне негізделген. Тепе-теңдік күйіндегі қасиеттерді анықтайтын бұл параметрлер а йнымалы күй деп аталады. Қысым және химиялық потенциал айнымалы күйдің басқа мысалдары болып табылады. Термодинамика айнымалы күйлер арасындағы сандық байланысты қамтамасыз етеді, бұл тепе-теңдік күйінде кез-келген термодинамикалық параметрлерді есептеуге мүмкіндік береді [34].

Термодинамикалық есептеулерге арналған кез-келген бағдарламалық жасақтама нақты және сенімді деректерді пайдаланбаса пайдасыз. Thermo-Ca lc бағдарламалық жасақтамасы әртүрлі сенімді ақпарат көздерінен (мысалы, SGTE, CAMPADA, CCT, ThermoTech, NPL, NIST, MIT, Theoretical Geo chemistry Group және т.б.) жинақталған, мұқият тексерілген жоғары сапалы мәліметтер базасын пайдалануға мүмкіндік береді. Мұндай мәліметтер база сында гетерогенді жүйеде әр фаза үшін әртүрлі термодинамикалық мо дельдер қолданылады [35]. Қазіргі уақытта Thermo-Calc қолданыстағы мәліметтер базасында көптеген материалдар, соның ішінде болаттар, қо рытпалар, керамика, балқымалар, әйнектер және басқа да көптеген жүйелер бар.

Thermo-Calc бағдарламасы идеалды емес фазалары бар жүйелер үшін а рнайы жасалған. Авторлар бұл көп компонентті жүйелердегі бес тәуелсіз а йнымалысы бар фазалық диаграммалардың еркін кескінін есептей алатын жа лғыз бағдарламалық жасақтама деп санайды [36].

Бұл бағдарламаның жұмысы Гиббс энергиясын ғаламдық минимиза циялаудың әмбебап алгоритміне негізделген, компоненттердің максималды саны 40 болатын бастапқы жуықтауды тапсырмай көп компонентті жүйелерді есептеу үшін жарамды. Осы бағдарламаның көмегімен фазалық диаграммаларды құрумен қатар, фазалардың термодинамикалық қасиеттерін (Гиббс энергиясы, энтальпия, жылу сыйымдылығы және т. б.), метастабильді тепе-теңдікті және т. б. есептеуге болады [36].

Бағдарлама сонымен қатар диаграммалардың басқа түрлерін есептеу құралдарын қамтиды, мысалы, CVD (CVD depositions), Scheil–Gulliver бо йынша қатаюды модельдеу, газдардағы ішінара қысым және т. б. ThermoCalc көмегімен жүйеде әр фаза үшін әртүрлі модельдерді қолданатын көптеген көздерден мәліметтер базасын пайдалануға болады [36].

Эксперименттік және есептеу әдістерін қолдана отырып, оның ішінде қазіргі заманғы Thermo-Calc бағдарламасын қолдана отырып, ликвидус пен солидус бетінің проекциясы, политермиялық слар, алюминий негізіндегі көп компонентті жүйелер қорытпаларының тепе-теңдік және тепе-теңдік емес кристалдану қисықтары салынды.

Бұл бағдарлама кез-келген бөлімді құруға ғана емес, сонымен қатар әртүрлі температурада қорытпаның фазалық құрамын сандық деңгейде есептеуге мүмкіндік береді (фазалардың массалық және көлемдік үлестерін, сондай-ақ олардағы элементтердің концентрациясын қоса). Есептеусіз толық ақпарат алу мүмкін емес. ThermoCalc бағдарламасы үнемді легирленген алюминий қорытпаларының фазалық құрамын талдауда өзін жақсы жағынан көрсетті [25, 37-39].

Бұл жұмыста есептеу кезінде ТТА17 алюминий базасы қолданылды. ТТА17 мәліметтер қорына енгізілген мәліметтерде В, С, Са, Со, Сг, Сu, Fe, Н, La, Li, Mg, Mn, Ni, Pb, Sc, Si, Sn, Sr, Ti, V, Zn, Zr, сияқты 23 элементтен тұратын алюминийге негізделген екілік және кейбір үштік жүйелер туралы ақпарат бар. [35]

3 Зерттеу нәтижелері

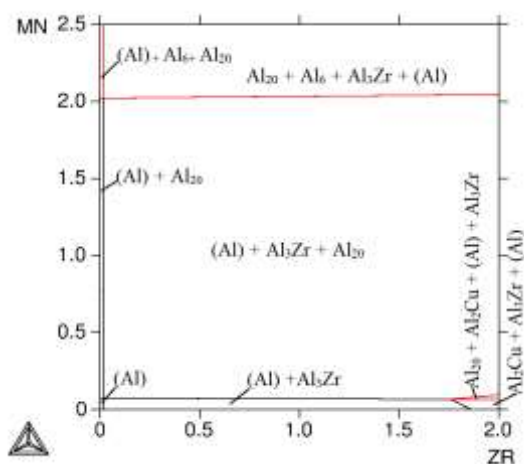
3.1 Al–Zr–Mn–Cu системасының фазалық диаграммасы - беріктігі жоғары алюминий қорытпаларының негізі.

Қорытпаның фазалық құрамын талдау үшін Al–Zr–Mn–Cu жүйес қажет. Есептеу жолымен (Thermo-Calc бағдарламасын пайдалана отырып) Al–Zr–Mn–Cu фазалық диаграммасы талданды. Өтімділік пен солидус беттерінің проекциялары салынды. Көріп отырғаныңыздай цирконийдің аз концентрациясынан бастап, алюминий (Al_3Zr) бастапқы кристалданады. Бұл жағдайда солидустың проекциясы көп фазалы аймақтың өте аз ұзындығымен сипатталады.

Алюминийдің қатты ерітіндісін күшейтудің басты факторы оның кристалдық торының бұрмалану дәрежесі мен сипаты екендігі белгілі [11]. Кристалдық тордың бұрмалану дәрежесі алюминий мен легірлеуші элементтің атомдық диаметрлері арасындағы айырмашылыққа байланысты: элементтің атомдық диаметрі неғұрлым көп болса, соғұрлым ол алюминийдің кристалдық торын бұрмалайды.

Thermo-Calc бағдарламасы идеалды емес фазалары бар жүйелер үшін арнайы жасалған. Авторлар бұл көп компонентті жүйелердегі бес тәуелсіз айнаымалысы бар фазалық диаграммалардың еркін кескінін есептей алатын жалғыз бағдарламалық жасақтама деп санайды [36].

Мыс пен марганецтың мөлшері жоғарылаған сайын $\text{Al}_{20}\text{Cu}_2\text{Mn}_3$ және Al_6Mn фазалары пайда болады, ол алюминий қатты ерітіндісімен тепе-теңдікте болады. Цирконий құрамының 0,5%–ға дейін артуы Al–Cu–Mn–Zr жүйесінің политемиялық кимасы диаграммасының құрылысына елеулі әсер етеді.



10 Сурет – Al–Zr–Mn–Cu системасы фазалық күй диаграммасының

350 және 550°С-та қорытпалардың фазалық құрамы бойынша сандық ақпарат келтірілген. Мыстың кішкене қоспасы қорытпаның кристалдану сипатына әсер етпейді. Тепе-тең емес кристалдану жағдайында марганецтің алюминийде ерігіштігі жоғарылайды, ал үштік қосылыстың түзілуі басылады. Демек, мұндай қорытпаларда Al_2Cu және Al_6Mn фазалары (Al) -мен қатар өмір сүреді.

Бастапқы кристалдар (Al) пайда болғаннан кейін Al_2Cu және $Al_{20}Cu_2Mn_3$ фазалары келесі реакцияға сәйкес түндырылады: $L \square (Al) + Al_2Cu + Al_{20}Cu_2Mn_3$ 557 ° С температурада. Мыс концентрациясының одан әрі өсуімен айтарлықтай өзгерістер байқалмайды.

Алюминий қорытпаларының нақты кристалдануы процесінде тепе-теңдіктен айтарлықтай ауытқулар пайда болады. Нәтижесінде құйма күйіндегі немесе құйманың фазалық құрамын бағалау арнайы әдістерді қажет етеді. 6-суретте осы модель бойынша есептелген тепе-тең емес кристалданудың қисықтары қатты фазалардың (Q_s) жалпы массалық үлесінің температураға тәуелділігі түрінде көрсетілген. Кез-келген қорытпаның кейбір маңызды сипаттамалары ликвидус (T_L) және солидус (T_S) температуралары. Осы температуралардың көмегімен термиялық өңдеу, қорытпалардың балқу және құю температуралары анықталады. Al - Cu - Mn - Zr жүйесінің кейбір қорытпалары үшін T_L және T_S мәндерін есептеу нәтижелері 6 кестеде көрсетілген. Есептеу нәтижелеріне сүйене отырып, мыс T_L -ге қатты әсер етпейді, бірақ T_S -ді айтарлықтай төмендетеді деген қорытынды жасауға болады. Екінші жағынан, 0,4% Zr қосу ликвидустыты 800 °С-ден жоғары көтереді [40].

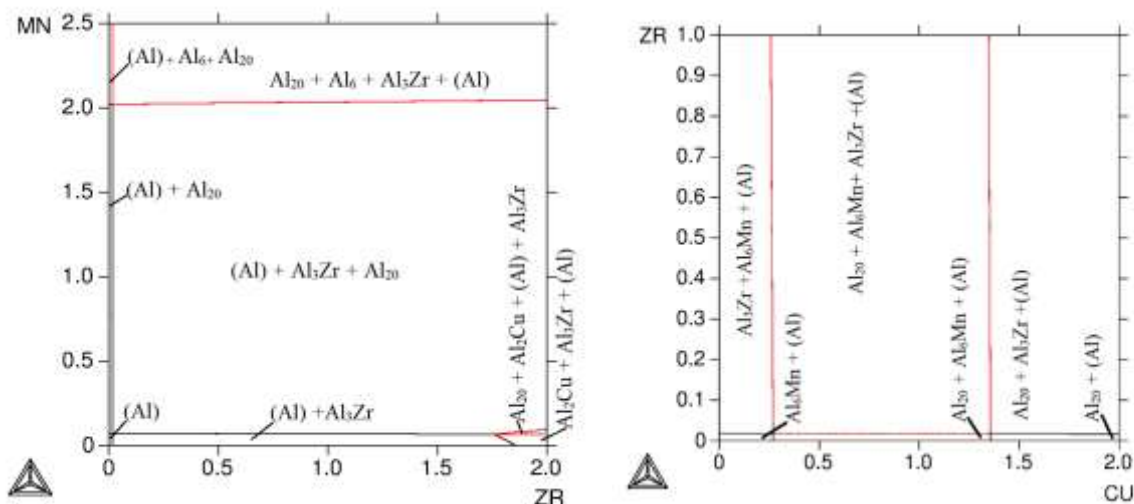
3.2 Al–Zr–Mn–Cu системасы фазалық диаграммасының изотермиялық және политермиялық қималары.

Ғылыми әдебиетте Al–Zr–Mn–Cu жүйесінің фазалық күй диаграммасын зерттеу туралы мәліметтер өте аз. Бұл жүйенің алюминий негізіндегі фазалық аймақтардың қатты күйдегі орналасуы белгісіз. Оны тек екі және үш компонентті система қорытпаларының фазалық құрамына легірлеуші элементтердің әсері туралы қолда бар ақпаратқа сүйене отырып болжау мүмкін емес. [41]

Жұмыста Thermo-Calc программасының (TTAL7 мәліметтер базасы) көмегімен, көп компонентті Al–Zr–Mn–Cu системасының фазалық диаграммасының политермиялық және изотермиялық қималары есептеліп тұрғызылды. Сондай-ақ техникада қолдану перспективсы жоғары алюминий қорытпаларының тепе-теңдік және тепе-теңдік емес күйдегі фазалық құрамы мен құрылысы зерттелді. Thermo-Calc программасы политермиялық және изо

термиялық қималарды құруға ғана емес, сонымен қатар берілген қорытпаның фазалық құрамын әртүрлі температурада есептеуге мүмкіндік береді (фазалардың массалық және көлемдік үлестерін, сондай-ақ олардағы элементтердің концентрациясын қоса). Мұндай ақпараттарды тәжірибелік зеттеу нәтижесінде алу мүмкін емес. Ұсынылып отырған жұмыста, құрамында 1,5% -ке дейін мыс, 1,8% -ке дейін марганец және 1% -ке дейін цирконий бар Al - Cu - Mn - Zr системасы қорытпаларының әртүрлі жылдамдықпен суытылған күйіндегі фазалық құрамы мен құрылысы зерттелді.

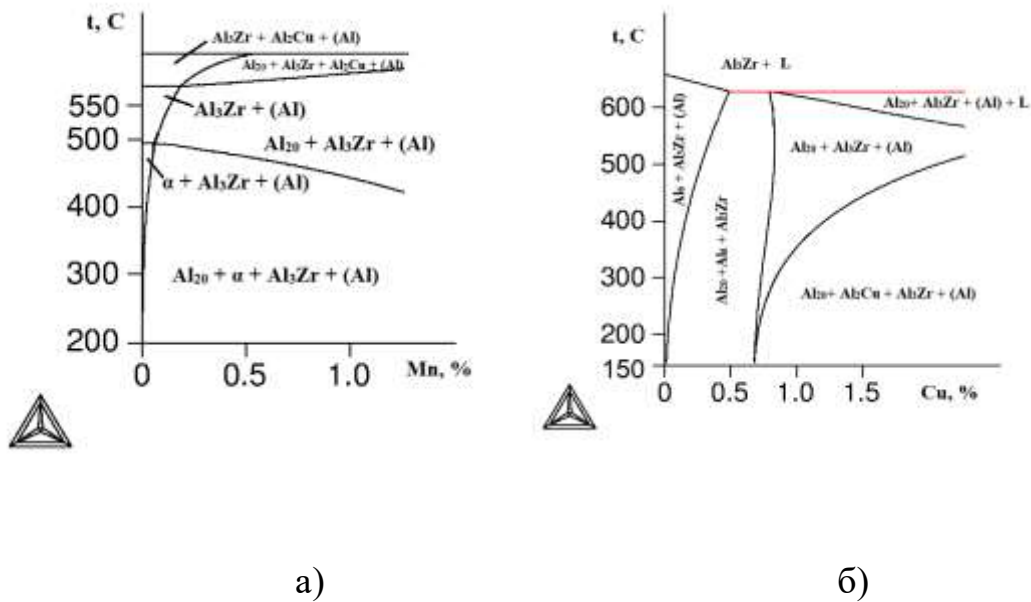
Al - Cu - Mn системасы қорытпаларында алюминий негізіндегі қатты ертінді мен (Al) және екі компонентті Al_2Cu , Al_6Mn және Al_4Mn фазаларымен тепе-теңдікте болатын $Al_{20}Cu_2Mn_3$ үш компонентті химиялық қосылыс бар. $Al_{20}Cu_2Mn_3$ фазасының химиялық құрамы (15,3% Cu және 19,8% Mn) 12,8 – 19% Cu және 19,8 – 24% Mn концентрация аралығында өзгереді. Бұл қосылыстың кристалдық торы - орторомбалық, параметрлері: $a = 2,411$ нм, $b = 1,251$ нм, $c = 7,71$ нм.; тығыздығы $3,59$ г/см³. Al_2Cu фазасында 0,1% -дан аз Mn, ал Al_6Mn фазасында шамамен 0,2% Cu бар [22].



11 Сурет – Al-Zr-Mn-Cu системасы фазалық күй диаграммасының изотермиялық қимасы (1,8% Mn, 1,5% Cu және 550 °C.)

550°C температурадағы изотермиялық қимада бұл қорытпаның екі фазы болатындығын көрінеді ((Al) + $Al_{20}Cu_2Mn_3$). Мыс пен марганец толығымен (Al) қатты ертінді құрамына кіреді және қорытпаның беріктігін арттыратын $Al_{20}Cu_2Mn_3$, Al_6Mn және Al_3Zr фазаларын құрайды. Al_2Cu фазасының тепе-теңдіктегі емес, эвтектикалық қосылыстарының үлесі аз болады және ол (Al) ішінде еруі керек. $Al_{20}Cu_2Mn_3$ фазасы (Al)-дан диспероид

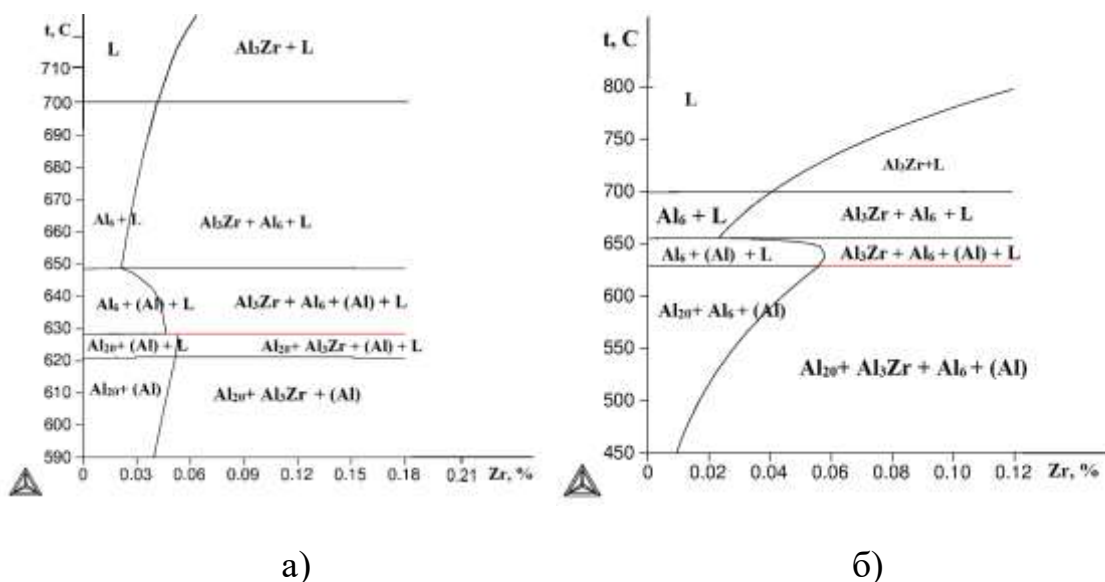
түрінде бөлінеді. Al_6Mn және Al_3Zr сияқты дисперсиялардың түзілуі төмен және олар қорытпаның жоғары температуралық беріктігін қамтамасыз етеді. Бұл жағдайда эвтектиканың құрылымы өзгермейді. [41]



12 Сурет – Al–Zr–Mn–Cu системасы фазалық күй диаграммасының по литермиялық қимасы

(a - 0,5% Mn, 1,5% Cu, б - 1,5% Cu, 1% Mn.)

Al_2Cu және Al_3Zr фазалары (Al) -мен тепе-теңдікте болуы мүмкін. Осы типтегі қорытпалардағы мыс мөлшері (Al) -дегі еру шегінен жоғары, сондықтан оның құрамында Al_2Cu қосындыларының белгілі бір мөлшері әрдайым болады. Al_2Cu фазасында 0,1% Mn дейін ериді, ал Al_2Mn қосылысында шамамен 0,2% Cu ериді. Қаныққан қатты ерітіндіден Al_3Zr фазасы бөлінгенде, параметрия = 4,05А болатын кубтық торы бар аралық фаза құрылады. Бастапқыда ол дөңгелектенген түйіршіктер түрінде, содан кейін желдеткіш тәрізді таралуы бар өзекшелер түрінде ерекшеленеді.



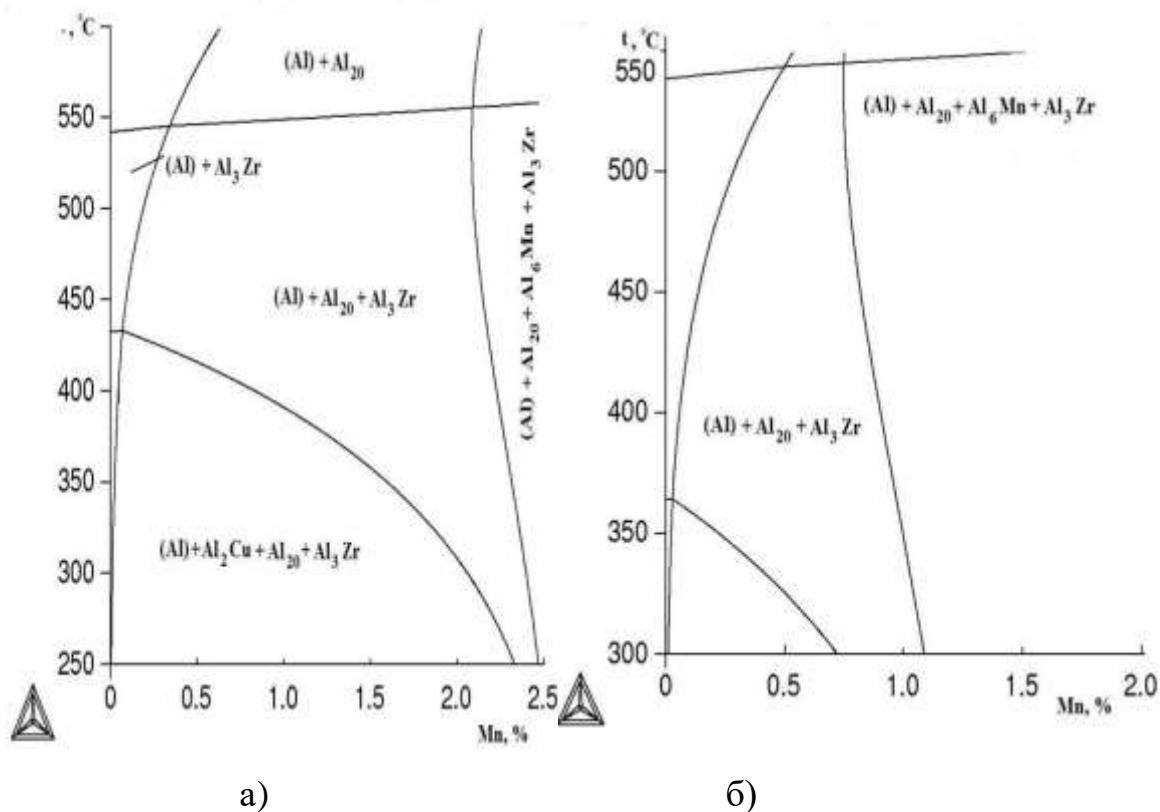
13 Сурет – Al–Zr–Mn–Cu системасы фазалық күй диаграммасының по литермиялық қимасы

(а-1.5% Cu, 0,2% Zr, б -0.5% Cu, 1% Zr)

Цирконийді екі компонентті қорытпаларға қосу нәтижесінде Al_3Zr фазасының пайда болатыны белгілі[22]. Цирконий екі компонентті қорытпалардың ликвидус температурасын едәуір арттыратыны белгілі. Есептеу көрсеткендей, мыстың болуы бұл өсу дәрежесіне аз әсер етеді, бұл 13-суретте көрсетілген политемиялық қималармен көрінеді. Ғылыми әдебиеттерде Al–Zr–Mn–Cu системасы фазалық диаграммасының құрылымы туралы мәліметтер жоқ болса да, фазалық аймақтардың осы төрт компоненттік системаның алюминий бұрышындағы қатты күйінде таралуын қолда бар ақпарат негізінде болжауға болатыны көрсетіледі. [41]

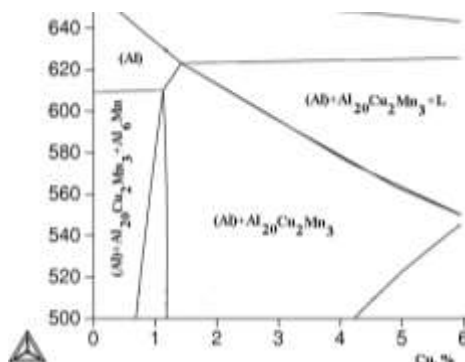
Бұл суретте Al–Zr–Mn–Cu жүйесінің политемиялық бөлімдері цирконийдің ауыспалы құрамымен көрсетілген. Марганец пен мыс құрамы 0,5-тен 1,5% -ке дейін және цирконий 0,2% -дан басталса, қатайтқыштың негізгі фазасының түзілуі сөзсіз жүреді және қорытпаның кристалдануы аяқталғанға дейін жалғасады.

Температураның әсерін 14-суретте келтірілген марганецтің ауыспалы құрамы бар политемиялық кесулер көрсетеді. Олардан мыс концентрациясының 1,5-ден 0,5% -ға дейін төмендеуі Al_2Cu фазасының пайда болу ықтималдығын азайтады.

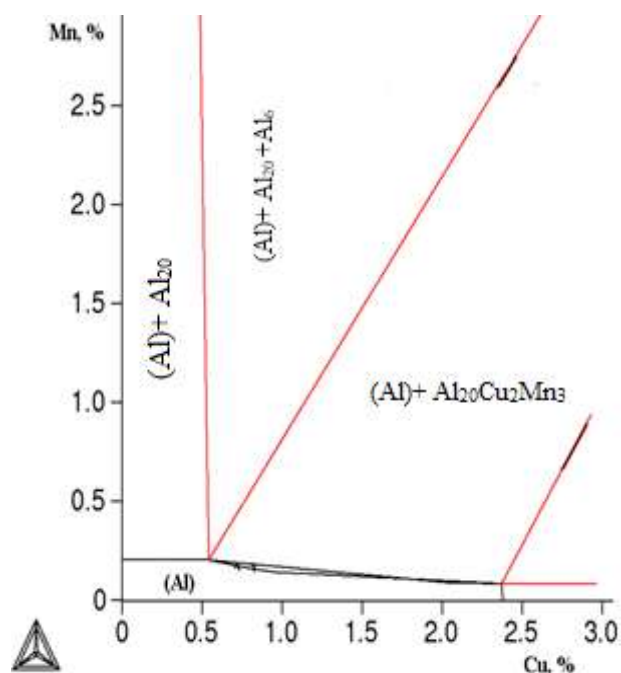


14 Сурет – 0,4% Zr және марганецтің ауыспалы құрамындағы Al–Zr–Mn–Cu жүйесінің политермиялық қималары

Тепе-тең емес кристалдану жағдайында марганецтің алюминийдегі ерігіштігі жоғарылайды, ал үштік қосылыстың түзілуі басылады (16-сурет). Демек, мұндай қорытпаларда Al_2Cu және Al_6Mn фазалары (Al) -мен қатар өмір сүреді. Бастапқы кристалдар (Al) пайда болғаннан кейін Al_2Cu және $Al_{20}Cu_2Mn_3$ фазалары келесі реакцияға сәйкес тұндырылады: $L \square (Al) + Al_2Cu + Al_{20}Cu_2Mn_3$ 557 ° C температурада. Мыс концентрациясының одан әрі өсуімен айтарлықтай өзгерістер байқалмайды. (17 Сурет). [42]



15 Сурет – Al–Zr–Mn–Cu системасы фазалық диаграммасының политермиялық қимасы (құрамында мыс мөлшері өзгермелі)



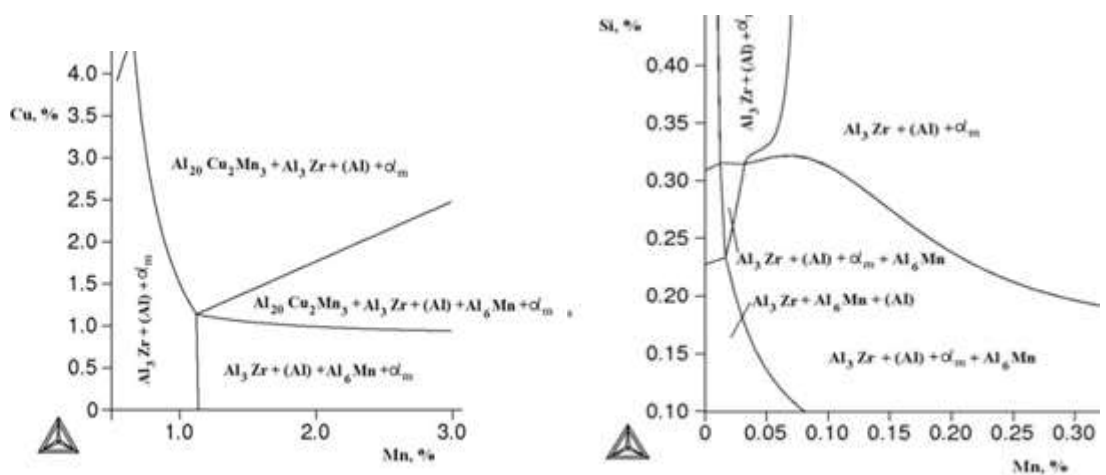
17 Сурет – Al–Zr–Mn–Cu системасы диаграммасының изотермиялық қималары (құрамындағы марганец пен мыс мөлшері өзгермелі)

3.3 Легірлеуші элементтер мен қоспалардың Al–Zr–Mn–Cu системасы қорытпаларының фазалық құрамына, құрылымына және қасиеттеріне әсері.

Кез-келген өнеркәсіптік қорытпаның фазалық құрамы, құрылымдық компоненттері және кристалдану сипаты тек пайдалану ғана емес, сонымен қатар технологиялық қасиеттерін (құю, қысыммен өңдеу, дәнекерлеу және т.б.) анықтайтын маңызды көрсеткіштер болып табылады.

Алюминий қорытпаларын құрайтын элементтердің жеке тобы легірлеуші элементтер мен қоспалар болып табылады, олар шихталы материалдардан, атап айтқанда техникалық тазалықтың алғашқы алюминийінен де, балқу процесінде де (тигельдерден, құралдардан, кездейсоқ ластанудан) шығуы мүмкін. Темір мен кремний (олар легірлеуші элементтер емес), әсіресе зиянды, негізінен қолайсыз морфологиясы бар кристалдану фазаларының пайда болуына байланысты, бұл механикалық қасиеттерді, әсіресе, иілгіштікті, сыныққа төзімділікті және қажуға төзімділікті айтарлықтай төмендетеді.

Толығырақ талдау үшін Al - Cu - Mn - Zr - Fe - Si және Al - Fe - Mn - Si - Ni фазалық диаграммаларының фрагменттері құрылды және олардың құрамындағы Si, Fe, Ni және Mn айнымалы құрамымен талданды. алюминий аймағы (18 Сурет), Thermo-Calc бағдарламасымен орындалған [43].



18 Сурет – Al - Cu - Mn - Zr - Fe - Si системасы диаграммасының изо термиялық қимасы. 0,3% Fe, 0,4% Zr. 500° C

Сондай-ақ, темір мен кремнийдің кішкене қоспасы деп айтуға болады қорытпаның кристалдану барысына іс жүзінде әсер етпейді, яғни тепе-теңдік кристалданудың тепе-теңдіктен ауытқуы шамалы және мүмкін қоспалар мен легірлеуші компоненттердің құрамына ғана емес, сонымен қатар қорытпаны балқыту технологиясына сәйкес болу шарттарына (қю температурасы, ұстау, салқындату шарттары) тәуелді болады.

Ең әмбебап шағын қоспа марганец болып табылады, ол көптеген өнеркәсіптік қорытпалардың құрамына кіреді. Марганец пен титан, цирконий, хром және ванадий сияқты өтпелі металдарды енгізудің негізгі мақсаты қорытпаларды қосымша нығайту болып табылады [44]. Бұл қатаю қатты ерітінділердің пайда болуының арқасында жүзеге асырылады, олар құймалар мен құймалардың тепе-тең емес кристалдануы жағдайында күй диаграммаларының метастұрақты нұсқасына сәйкес көбінесе өте қатты қаныққан болып шығады. Бұл ерітінділер кейінгі технологиялық қыздыру кезінде ыдырайды, ал пайда болған өтпелі металдардың екінші реттік алюминидтері, әсіресе жоғары температурада, біршама қаттылыққа ықпал етеді.

Марганец (Al) немесе екі фазаның бірінің құрамында болуы мүмкін: $Al_6(FeMn)$ және $Al_{15}(FeMn)_3Si_2$. Бірінші фазаның эвтектикалық бөлшектері қырлы кристалдарға ұқсайды, ал екіншісі Al_3Fe_2Si фазасына ұқсас, бірақ соңғыларына қарағанда біршама өрескел. Деформациядан кейін барлық қосылыстар аз немесе аз жинақы болады, бұл фазаларды анықтауды қиындатады. Темір мен марганецтің құрамы жоғарғы шекке жақын болған кезде, Mn бар фазалардың бастапқы кристалдары салыстырмалы түрде үлкен көпбұрыштар түрінде пайда болуы мүмкін, олар қыздыру және деформация процесінде іс жүзінде өзгермейді. Марганецтің концентрациясы (Al) қатаю а

яқталғаннан кейін қорытпадағы Fe және Si құрамына байланысты болады. Жоғары таза алюминийде дайындалған АМц типті қорытпаларда барлық дерлік марганец қатты ерітіндіге ене алады. Fe мен Si мазмұны жоғарғы шекарада болғанда, Mn (Al) концентрациясы қатты төмендейді [45].

(Al) жағынан эвтектиканы құрайтын темір қатты алюминийде аз ериді (проценттің жүзден бір бөлігі) және өте тез кристалданған кезде де қаныққан қатты ерітінді түзбейді. Оның алюминий қорытпаларына енгізілуі әрдайым кристалданудың артық фазаларының пайда болуын тудырады, бұл көбінесе икемділік пен коррозияға төзімділікті төмендетеді. Сондықтан, көптеген жағдайларда темір легирленген қоспа немесе қоспа ретінде қажет емес. Алайда, қиын балқитын темір алюминийі ыстыққа төзімділікке пайдалы әсер етеді, және бұл қасиет шешуші болған кезде ол легірлеуші элементі ретінде қолданылады. Жоғары температурада күйдіруге байланысты эвтектикалық шығу тегі көрсетілген алюминидке ықшам форма берілуі мүмкін, содан кейін олардың пластикаға кері әсері айтарлықтай төмендейді. Сондай-ақ, аз мөлшерде енгізілген бұл қосымша эвтектиканың көлемдік үлесін едәуір арттыратынын және осыған байланысты құю қасиеттерін жақсартатынын атап өткен жөн.

Беріктендіруден басқа, өтпелі металл қоспалары көбінесе түйіршіктерді ұсақтау арқылы қорытпалардың жарамдылығын жақсартады. Цирконий бұл тұрғыда әсіресе тиімді. Сондай-ақ, цирконий қоспасы әртүрлі коррозияға төзімділікті арттырады. Айта кету керек, аталған қоспалардың оң әсеріне технологияны қатаң сақтаған жағдайда ғана қол жеткізуге болады. Әйтпесе, олардың қорытпада болуы пайдасыз және тіпті зиянды болуы мүмкін. Мысалы, егер осы енгізілген қоспамен балқыманың температурасы, әдетте, лигатурадан тым төмен болса, онда құймалардың құрылымында механикалық қасиеттерін төмендететін өрескел бастапқы алюминий болуы мүмкін. Бұл алюминий жағында перитектикалық типке жататын және ликвидус температурасының күрт өсуімен сипатталатын екі фазалы диаграммалардан туындайды [22].

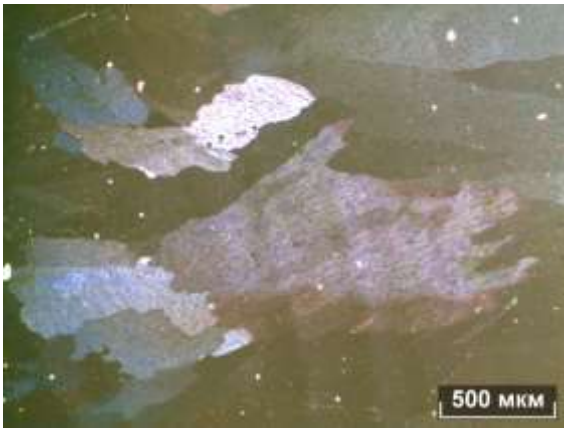
Цирконийдің екілік қорытпаларға қосылуы Al_3Zr фазасының түзілуіне әкелетіні белгілі. Цирконий қос қорытпалардағы сұйық температураны едәуір арттыратыны белгілі. Есептеу көрсеткендей, мыстың болуы бұл жоғары деңгейіне аз әсер етеді, оны 7-кестеде келтірілген мәліметтер көрсетеді. Цирконийдің қосылуы, марганецтен айырмашылығы, метастабильді Al_3Zr фазасының екінші реттік тұнбаларының түзілуіне байланысты дисперсияның едәуір күшеюіне әкеледі. Бұл әсер скандийдің әсеріне ұқсас. Al_3Zr және Al_3Sc фазаларының көлемдік үлестерін есептеуді енгізу 0,2% Zr шамамен 0,1% Sc-ге тең екенін көрсетеді, яғни айтарлықтай беріктендіру үшін қорытпадағы цирконийдің концентрациясы кемінде 0,5-0,6% болуы керек. А

лайда, цирконийдің мұндай концентрацияларын алюминий қорытпаларына енгізу белгілі бір қиындықтарды тудырады, бұл Al – Zr фазалық диаграмма сының ерекшелігіне байланысты. Ликвидустың күрт жоғарылауына байланысты балқыманы дайындау температурасы 800 - 850 ° C-тан жоғары болуы керек, өйткені әйтпесе сұйық фазада цирконийдің толық еруі мүмкін емес. Al - Zr фазалық диаграммасының тағы бір ерекшелігі - оның жеделдетілген қатаяу кезінде бастапқы кристалдану аймағын (Al) кеңейтуге айналуы. Бұл жағдайда (Al) құрамына кірген барлық цирконий толық салқындағанға дейін сол жерде сақталады. Егер V_c 5 K / с болса, онда құйылған күйде кем дегенде 0,5% Zr болатын қатты ерітінді алуға болады. Егер қату жеткілікті тез болмаса, онда Al_3Zr фазасының ірі өрескел бастапқы кристалдары пайда болуы мүмкін, бұл цирконий концентрациясының (Al) төмендеуімен жүреді.

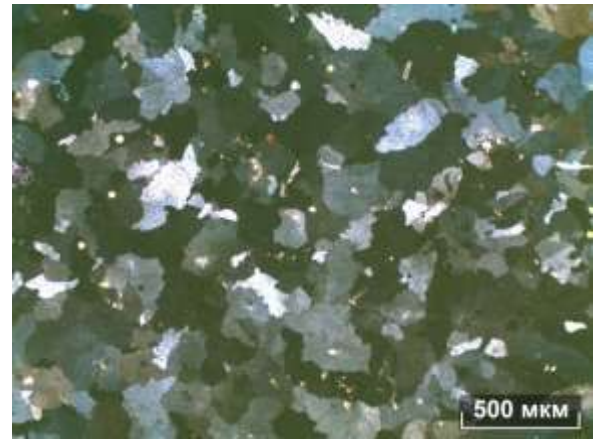
Al_3Zr метастабильді фазаларының екінші реттік бөлінуінің пайда болуымен қатты ерітіндінің ыдырауы 350 - 400 ° C -тан басталады. Жоғары температурада тұрақты фазаның пайда болуы мүмкін, ол метастабильді сияқты күшті беріктендіргіш емес. Цирконий қоспасы (марганец сияқты) тар кристалдану аралығын және қорытпалардың жоғары құю қасиеттерін сақтауға мүмкіндік береді [37].

3.4 Алюминий негізіндегі құйма қорытпалардың микроқұрылысы

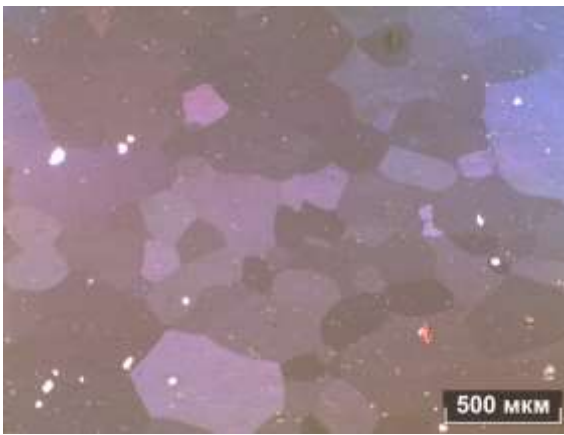
19-суретте зерттелген Al-Zr қорытпаларының тән микроқұрылымдары көрсетілген. Жоғарыда аталған құрылымдардың ерекшелігі: цирконийді енгізу кезінде алюминий негізіндегі қатты ерітіндінің кристалдары қатты ұсақталады. Бұл кристаллизатордағы балқыманың сұйық температурадан жоғары температурадағы салқындату жылдамдығы өте жоғары екендігіне байланысты. Мұндай жағдайларда бір уақытта көптеген кристалдану орталықтары пайда болады, бұл түйіршіктердің ұсақталуына әкеледі. Екінші жағынан, салқындату жылдамдығында Al_3Zr бастапқы фазалық кристалдардың бөлінуі толығымен басылмайды, дегенмен оның кристалдарының белгілі бір санын құруға уақыт бар. Сонымен бірге олардың мөлшері субмикроскопиялық деңгейде (СЭМ анықтамайды). Бұл тұнбалар қосымша кристалдану орталықтары ретінде қызмет ете алады, бұл сонымен қатар түйіршіктердің ұсақталуына әкеледі және олардың өсуін тежейді.



а)



б)



в)



г)

19 Сурет – Құйма күйдегі қорытпалардың микроқұрылымы
а) Al-0,18% Zr; б) Al-0,28% Zr; в) Al-0,38% Zr; г) Al-0,48% Zr

3.4.1 Алюминий қорытпаларының қасиеттеріне оларды қыздырып өндеу температурасының әсері

Қыздыру жарық микроскопында анықталған құрылымға айтарлықтай әсер етпейді, сондықтан тазарту процесінде құрылымдық және фазалық өзгерістер электр кедергісі мен қаттылықтың өзгеруімен, сондай-ақ есептеу нәтижелерімен бағаланды [46]. Al–Zr күй диаграммасына сәйкес эксперименттік қорытпалар (егер қоспалар ескерілмесе) барлық температура да екі фазалы аймаққа (Al)+Al₃Zr түседі. Ерекшеліктер 0,18Zr және 0,3Zr қорытпалары болып табылады, олар 650 °C температурада бір фазалы болуы керек. Сипаттамалық температурадағы фазалық құрам параметрлерінің сандық мәндері 4-кестеде келтірілген. Есептеу тұрақты және метастабильді тепе-теңдік үшін жүргізілді, оған сәйкес D₀₂₃ және L₁₂ фазалары сәйкесінше қалыптасады [47]. 4-кестеде Zr-дің (Al) ерігіштігі 400-450 °C-тан жоғары

температурада айқын өсетіндігі көрсетілген. Бұл жағдайда метастабильді вариант үшін ерігіштік тұрақты нұсқаға қарағанда едәуір жоғары болады.

Тәуелділіктерден көп сатылы күйдіру кезінде электр кедергісінің ең төменгі мәндері 450 °С-та жетеді, бұл алюминий қатты ерітіндідегі цирконий концентрациясының максималды төмендеуімен түсіндіріледі ($C_{Zr-(Al)}$) Бұл метастабильді нұсқа бойынша есептік деректерге сәйкес келмейді, оған сәйкес осы температурада $C_{Zr-(Al)}$ шамасы өте маңызды (4 Кесте). Бұған екі түсініктеме табуға болады. Біріншіден, төмен температурада (400 °С-тан төмен) цирконийдің (Al) диффузиясы салыстырмалы түрде аз, сондықтан толық ыдырау процесі едәуір ұзақ уақытты қажет етеді [48,49]. Атап айтқанда, [50] мәліметтері бойынша, тіпті 300 °С температурада 500 сағаттық тазарту жеткіліксіз. Екіншіден, 450 °С кезінде Zr (Al) (DO_{23} фазасы үшін) тепе-теңдік ерігіштігіне назар аудару керек, бұл метастабильді нұсқаға қарағанда едәуір аз (4 Кесте).

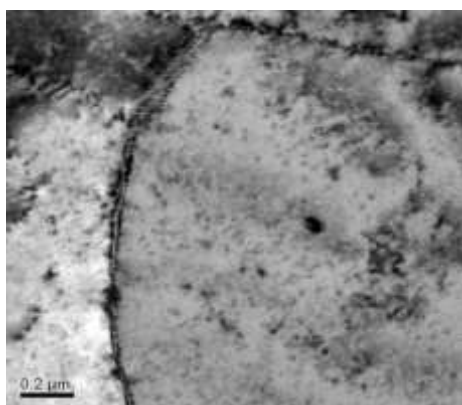
4 Кесте – Тәжірибелік қорытпалар құрылысының әр түрлі қыздырып өңдеу режимдерінен кейінгі параметрлері

Қорытпа ¹	Температура, °С	Тұрақты тепе-теңдік		Метаұрақты тепе-теңдік	
		$C_{Zr-(Al)}$ ² , ма сс. %	Q^3 , масс. %	$C_{Zr-(Al)}$ ² , ма сс. %	Q^3 , ма сс. %
02Zr	300	0,003	0,33	0,037	0,27
	350	0,009	0,32	0,072	0,20
	400	0,019	0,30	0,125	0,10
	450	0,038	0,27	0,180	0
	500	0,068	0,21	0,180	0
	550	0,113	0,13	–	–
	600	0,178	<0,01	–	–
	650	0,180	0	–	–
03Zr	300	0,003	0,52	0,037	0,46
	350	0,009	0,51	0,072	0,39

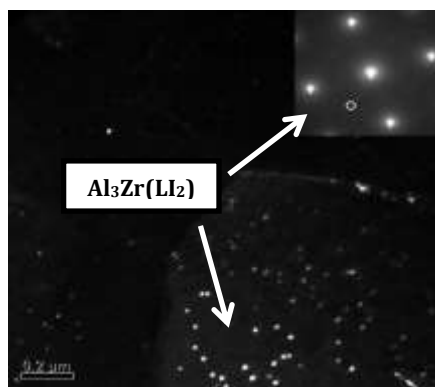
	400	0,019	0,49	0,125	0,29
	450	0,038	0,46	0,203	0,14
	500	0,068	0,40	0,283	0
	550	0,113	0,32	–	–
	600	0,178	0,19	–	–
	650	0,267	0,02	–	–
04Zr	300	0,003	0,71	0,037	0,65
	350	0,009	0,70	0,072	0,58
	400	0,019	0,68	0,125	0,48
	450	0,038	0,65	0,203	0,33
	500	0,068	0,59	0,309	0,14
	550	0,113	0,51	–	–
	600	0,178	0,38	–	–
	650	0,267	0,21	–	–
05Zr	300	0,003	0,90	0,037	
	350	0,009	0,89	0,072	
	400	0,019	0,87	0,125	
	450	0,038	0,84	0,203	
	500	0,068	0,78	0,309	
	550	0,113	0,69	–	–
	600	0,178	0,57	–	–
	650	0,267	0,40	–	–
¹ 3-кестеде, ² алюминий қатты ерітіндідегі цирконий концентрациясы, ³ Al ₃ Zr фазаның массалық үлесі					

Қаттылықтың C_{Zr} -ге тәуелділігі, негізінен, L_{12} (Al_3Zr) фазасының нано бөлшектерінің мөлшеріне байланысты, олар жұмыс қатаюының сақталуын анықтайды. CZr -нің айтарлықтай әсері Т350, Т400 және Т450 режимдерінде күйдірілгеннен кейін, әр қорытпадағы осы нанобөлшектердің мөлшері максималды болған кезде көрінеді.

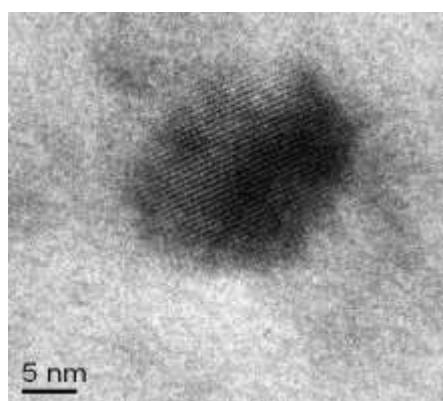
Жарық өрістегі 0,38% Zr қорытпасының микроқұрылымының кескінінде (20 Сурет) Al_3Zr фазасының тұнбалары астықтың ортасына біркелкі таралмай, жеңілдік концентрациясы орындарын безендіретіндігі айқын көрінеді. Артықшылықты сырғанау және сыну жазықтықтарымен (бөлшектеу жазықтықтарымен) ұқсас, түйіршіктерде фаза бөлудің басым жазықтықтары бар деген әсер пайда болады. Мұндай жазықтықтар, әдетте, әртүрлі фазалардың жазықтықтары болып табылады, олар бір-біріне жақсы геометриялық сәйкес келеді, оларда Гинье-Престон аймақтарының пайда болуы қаныққан қатты ерітінділердің қартаюуы кезінде жүреді.



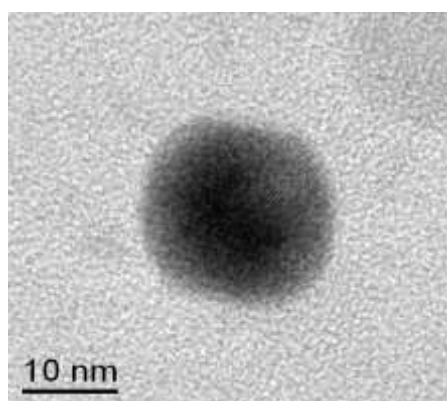
а)



б)



в)



г)

20 Сурет – Қыздырудан кейін 0,38% Zr қорытпасындағы Al_3Zr метастабильді фазаның бөлінуі.
а) жарық өрісте; б) қараңғы өрісте; в), г) жоғары көрініс шегі.

Сонымен қатар, бұл бөлшектер матрицалық қатты ерітіндінің түйіршіктерінің шекараларында шығарылады, бұл оларды әлсіретіп, созылу жүктемелерінің әсерінен тез ыдырауға әкелуі мүмкін. Осы себепті бұл процесс қажет емес және оны жүзеге асыру жағдайларын анықтау маңызды ғылыми және практикалық мәнге ие.

Қараңғы өрістегі сурет (20 б сурет) Al_3Zr бөлшектерінің біркелкі емес орналасу фактісін растайды. Сонымен қатар, олар пішіні сфералық болып табылатын түйіршіктің ішіндегі өте дисперсті аймақтарды безендіреді. Микродифракция деректері бұл наноөлшемді бөлшектер Al_3Zr фазасының метастабильді модификациясы (L_{12}) екенін көрсетеді, олар қаныққан қатты ерітіндіні қыздыру кезінде шығарылады. Олардың пішіні қызықты болып көрінеді - матрицаның айтарлықтай кернеулерін тудыратын және ескі қорытпаның жалпы қатаюына әкелетін іс жүзінде дұрыс сфера. Жоғары күйдіру температураларында - $650^\circ C$, төмен қатаю эффектімен тұрақты фаза тұндырылады. 20-суреттен көріп отырғанымыздай, бұл бөлшектердің орташа мөлшері 10 нм-ден аспайды. $450^\circ C$ -тан жоғары қыздырғанда бөлшектер қатанданады, содан кейін олар тұрақты фазаға айналады $D0_{23}$, оны СЭМ әдісімен көруге болады. Т600 режимінде күйдіргеннен кейін тұрақты фазаның тұнбаларының мөлшері 2 мкм жетеді (21 Сурет).



21 Сурет – Қыздырып өңделгеннен кейін 0,38% Zr қорытпасындағы Al_3Zr тұрақты фазасының нанокристалдары

Ең үлкен қатаюды алу тұрғысынан барлық цирконий L_{12} фазасының на нобөлшектеріне қосылуы керек және бұл үшін күйдіру температурасы ең төмен болуы керек, өйткені бұл жағдайда C_{Zr} тепе-теңдік мәні минималды болады (4 Кесте). Әрине, бұл жол практикалық қолдану үшін қолайсыз, өйткені ұстау уақыты өте ұзақ. Сонымен қатар, ыстыққа төзімді қорытпалар максималды жұмыс температурасынан жоғары температурада тұрақтандырғыш термиялық өңдеуден өтуі керек екенін ескеру қажет.

3.4.2 Үнемді легирленген, беріктігі жоғары алюминий қорытпаларының оптимал құрамын анықтау.

Жоғары беріктігі бар алюминий қорытпаларын әзірлеу үшін $Al - Cu - Mn - Zr$ жүйесі 3 %-дан аспайтын легірлеуші компоненттері және қоспаларға арналған әдеттегі талаптары бар негіз ретінде таңдалды.

L_{12} құрылымымен (диспероидтар) Al_3Zr , Al_3Sc және $Al_3(ZrSc)$ фазаларының қайталама тұнбалары алюминий қорытпаларында ең тиімді қатайтқыш болып табылады [51]. Бұл алюминий матрицасына сәйкес дисперсті (10 нм-ден аз) бөлшектердің пайда болуымен байланысты.

Кристалдану кезіндегі салқындату жылдамдығы (V_c) және құю алдындағы балқу температурасы (T_m) осы топтың қорытпалары үшін маңызды технологиялық параметрлер болып табылады. Гетерогенизациялық қыздырудан кейінгі қатаю әсері L_{12} фазасының қайталама бөлінуінің бөлшектері арасындағы орташа қашықтыққа (иінді) байланысты болады [51]. Егер соңғысының (d) өлшемін (шын мәнінде 5-10 нм) кішірейтетін болсақ, онда олардың біркелкі бөлінуімен L мәні тек тұнбалардың көлемдік үлесімен (Q_v) анықталады. Q_v мәні, өз кезегінде, цирконий мен скандийдің бастапқы (яғни құйылған күйде) алюминий қатты ерітіндісіндегі құрамына байланысты – (Al). Бастапқы алюминидтердің (Al_3Zr немесе Al_3Sc) болуы өте жағымсыз екені анық.

Алдымен, екілік $Al - Zr$ қорытпаларын қарастырайық, өйткені цирконий ликвидусты (T_L) күрт арттырады, бұл әдеттегі құю температурасын (700-750 °C) пайдалануға мүмкіндік бермейді. Сағаттық ұсталымнан кейін (әртүрлі T_m кезінде) шынықтыру әдісімен салынған ликвидус сызығы тиісті температурада балқыманың құрылымы туралы түсінік береді. Бұл суретте $T_m > T_L$ (қажетті қызып кетуді ескере отырып, кем дегенде 30 °C температурада $T_m > T_L + 30$ ұсынуға болады) шарттары әрдайым (оның ішінде өте тез кристалдану кезінде) орындалуы керек екендігі көрсетілген. Әйтпесе, Al_3Zr бастапқы кристалдары балқымада болады (яғни, құю алдында) және құйма

құрылымында анық болады. Өнеркәсіптік жағдайларда рұқсат етілген T_m мәндерінің жоғарғы шегі (құймалар мен құймаларды алу кезінде) 800-850 °C болғандықтан, 0,6% Zr-ден жоғары концентрацияны қарастыру орынсыз.

Екінші жағынан, салқындату жылдамдығы ZR-ге (Al) қаныққан қатты ерітіндінің пайда болуына әсер етеді [44,52]. Металл қалыптарда ($V_c=10-20$ К/с) жұқа қабырғалы құймаларды алу кезінде цирконийдің осындай салыстырмалы түрде үлкен концентрациясын (яғни 0,6% Zr) пайдалану мүмкін болуы тиіс. Төмен концентрацияларда V_c мәндері де қолайлы.

Циркониймен қаныққан алюминий қатты ерітіндісінің ыдырауы кезінде дисперсияның қатаюына байланысты мүмкін беріктікті бағалау үшін әр түрлі қыздыру режимдерінде қос қорытпалардың құймаларының қаттылығының өзгеруі анықталды. Беріктендіру қисықтарын талдау 0,2% Zr бар қорытпаның қаттылығының артуы (өнеркәсіптік алюминий қорытпала рындағы оның жоғарғы шегіне сәйкес келеді) іс жүзінде жоқ екенін көрсетті. Екінші жағынан, НВ-ның айтарлықтай өсуі (2 еседен астам) 0,4% Zr кезінде байқалады. Алайда, бір сатылы қыздыру кезінде қатайту өте баяу жүреді (30 сағаттан астам), сондықтан уақытты 10 сағатқа (немесе одан да аз) қысқартуға мүмкіндік беретін көп сатылы жылытуды қолдану ұсынылады. 0,4% Zr бар қорытпаның құрылымы (23б сурет) беріктендіру дәл Al_3Zr дисперсоидтарымен байланысты екенін көрсетеді, ал есептеу мәні 34-68 ($d=5-10$ нм) құрайды. 23б суретінен қатайту әсері 450 °C-қа дейін сақталатындығын көруге болады, бұл скандий бар қос қорытпаларға қарағанда едәуір жоғары. Бұл Al_3Zr дисперсоидтарының жоғары жылу тұрақтылығын көрсетеді, бұл әсіресе ыстыққа төзімді қорытпаларды жасау кезінде пайдалы болуы мүмкін.

Әр түрлі жылдамдықпен суытылған (7К/с және 20К/с) бір қорытпаның НВ мәндері құйылған күйде айтарлықтай айырмашылыққа ие болуы мүмкін екендігі анықталды. Атап айтқанда, Al-0,5% Sc қорытпасы V_c төмен мәнінде екі есе артық қаттылыққа ие.

НВ-нің жоғарылауын тек қату аяқталғаннан кейін салқындаған кезде қаныққан қатты ерітіндінің ыдырауы тұнба түзілуімен ішінара жүретіндігімен түсіндіруге болады. Қыздырғаннан кейін «баяу кристалданған» қорытпаның қатаюы төменірек болып шығады, мұны «тез кристалданғанмен» салыстырғанда Бөліністердің біркелкі емес таралуымен түсіндіруге болады. Салқындату жылдамдығының құйма қаттылыққа және одан кейінгі қатаюға әсерінің ұқсас әсері Al-0,3% Sc-0,2% Zr үштік қорытпасында да көрінді. Құйма күйдегі "баяу кристалданған" қорытпалардың жұқа құрылымын талдау дисперсоидтардың көп мөлшерінің болуын растайды. Ала

йда, осы бөлшектердің таралуының біркелкі емес сипатын атап өту керек. $V_c = 20$ К/с кезінде олардың салыстырмалы түрде аз мөлшері байқалады, алюминий қатты ерітіндісінің жоғары легірленуі сақталады, бұл қыздыру кезінде беріктендірудің жоғары әсерін анықтайды ($V_c = 7$ К/с-пен салыстырғанда).

ҚОРЫТЫНДЫ

Диссертациялық жұмыста марганец пен мыс бар Al-Zr қорытпалардың термиялық режимдерін өңдеу оңтайлыландырудың өзекті ғылымдық сұрақтың қарастырылады. Жұмыста қойылған міндеттерді шешу компьютерлік фазалық және талдау диаграммалардың элементтерін құру әдістемелері мен және физикалық материалтанудың заманауи құралдары мен жабдықтарын қолдана отырып эксперименталды түрде жүзеге асырылды.

1. Thermo-Calc бағдарламасын (TTAL7 базасы) қолдана отырып, Al-Zr-Cu-Mn жүйесінің политермиялық және изотермиялық бөліктері концентрация саласында есептелген және салынған: 0-1% Zr, 0-1, 8% Mn, 0-1, 5% Cu (масса.%). Есептеулер Al-Zr-Cu-Mn жүйесінің қорытпаларын кристалдану және кейіннен салқындату процесінде алюминий (Al) негізіндегі қатты ерітіндіден және белгілі Al_3Zr фазасынан басқа бірқатар жаңа фазалар пайда болатындығын көрсетті: Al_2Cu , Al_6 қос фаза Al_6Mn , Al_{20} – үштік қосылыс $Al_{20}Cu_2Mn_3$ және т. б. Алюминий қатты ерітіндісі қорытпаның құрамына және температураға байланысты жоғарыда аталған фазалармен тепе-теңдікте болуы және көп фазалы реакцияларға қатысуы мүмкін.

Есептеулер мен эксперименттік зерттеулер тепе-теңдік фазасының Al_3Zr (L_{12}) бастапқы кристалдарының түзілу тепе-тең емес жағдайларында тез салқындаған кезде балқымадан тікелей басылатындығын және қатты күйде Al_3Zr (DO_{23}) фазасының екінші наноөлшемді бөлшектері қаныққан алюминий ерітіндісінен бөлінетінін көрсетті.

Термодинамикалық TTAL7 базаларын қолдана отырып, Thermo-Calc бағдарламасы бойынша эксперименттік зерттеулер мен есептелген мәліметтер нәтижелерінің жақсы сәйкестігі көрсетілген.

2. Көп сатылы күйдіру кезінде алюминий қатты ерітіндідегі цирконий концентрациясының максималды төмендеуі байқалады. Бұл метастабильді нұсқа бойынша есептелген деректерге сәйкес келмейді, бұған екі түсініктеме табуға болады. Біріншіден, төмен температурада (400 °C-тан төмен) цирконийдің в (Al) диффузиясы салыстырмалы түрде аз, сондықтан толық ыдырау процесі едәуір ұзақ уақытты қажет етеді, кейде тіпті 300 °C-та 500 сағаттық тазарту жеткіліксіз. Микродифракция деректері бұл наноөлшемді бөлшектер Al_3Zr фазасының метастабильді модификациясы (L_{12}) екенін көрсетеді, олар қаныққан қатты ерітіндіні тазарту кезінде шығарылады. Олардың пішіні қызықты болып көрінеді-матрицаның айтарлықтай кернеулерін тудыратын және ескі қорытпаның жалпы қатаюына әкелетін іс жүзінде дұрыс сфера. Жоғары температурада-650°C температурада тұрақты фаза аз қатайтатын әсерге ие болады. Яғни, алюминий қорытпалары үшін термиялық өңдеудің оңта

йлы режимі 450 – ден 650°C -ге дейін тазарту болып табылады, олар қандай құрылымды алғысы келеді.

3. Беріктік, меншікті электр кедергісі және ыстыққа төзімділік мәндерінің ең жақсы үйлесімі цирконийдің қорытпадағы мөлшері 0,3% -дан кем емес және термиялық өңдеу 400-450 °С температурасы кезінде қол жеткізілетіндігі көрсетілген. Нақты электрлік кедергілесі қатты негізінен физика теориялық ережелеріне сәйкес келетін алюминий қатты ерітіндідегі цирконийдің құрамына байланысты екендігі көрсетілген. Алюминийдің қатты ерітіндісіндегі цирконийдің ең аз мөлшерін 450°C температурада 3 сағаттық тазарту арқылы қамтамасыз етуге болатындығы анықталды.

ПАЙДАЛАНҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- 1 Ю.В.Борисоглебский, Г.В.Галевский, Н.М.Кулагин, М.Я.Минцис, Г.А.Сиразутдинов *Металлургия алюминия. /Раздел ГРНТИ: Производство цветных металлов и сплавов/ Наука, 1999 г.*
- 2 Каблов Е.Н. Основные итоги и направления развития материалов для перспективной авиационной техники /В кн. 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932-2007: Юбилейный науч.-технич. сб. М: ВИАМ. 2007.- С. 20-26.
- 3 Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» //Авиационные материалы и технологии. 2015. - №1 (34). - С. 3-33.
- 4 Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Вершков А.В. Редкие металлы и редкоземельные элементы-материалы современных и будущих высоких технологий //Труды ВИАМ. 2013. - №2. - Ст. 01(viam-works.ru).
- 5 Каблов Е.Н. Материалы для изделия «Буран» - инновационные решения формирования шестого технологического уклада //Авиационные материалы и технологии. 2013. - №S1.- С. 3-9.
- 6 Корнышева И.С., Волкова Е.Ф., Гончаренко Е.С., Мухина И.Ю. Перспективы применения магниевых и литейных алюминиевых сплавов //Авиационные материалы и технологии. 2012. - №S. С. 2012-222.
- 7 Аменова А.А. Теоретические и экспериментальные исследования фазового состава, структуры и свойств сплавов системы Al-Ni-Fe-Mn-Zr-Si: дис. ... доктора PhD – Алматы, 2014. - 141 с.
- 8 Промышленные алюминиевые сплавы: справ. / под ред.Алиева С.Г., Альт М.Б., Амбарцумян СМ. и др. - 2-е изд., -М.: Metallurgia, 1984. - 528с.
- 9 Строганов Г.Б., Ротенберг В.А., Гершман Г.Б. Сплавы алюминия с кремнием. – М.: Metallurgia, 1977. - 271 с.
- 10 Белов Н.А. Фазовый состав алюминиевых сплавов. - М.: Издательский Дом МИСиС, 2009. – 392 с
- 11 Торопова Л.С. Пересыщенные твердые растворы некоторых переходных металлов в алюминии // Цветная металлургия. – 1987. – №12. – С. 17-19.
- 12 Uliasz P., Knych T., Mamala A., Smyrak B. Investigation in Properties Design of Heat Resistant AlZrSc Alloy Wires Assigned for Electrical Application // Aluminium Alloys: Their Physical and Mechanical Properties. - 2008, - P. 248-255
- 13 Колачев Б.А., Елагин В.И., Ливанов В.А.. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов: учебник для вузов. - 3-е изд. перераб. и доп. - М.: МИСиС, 1999. – 416с.
- 14 Бондарев Б.И., Шмаков Ю.В. Технология производства быстрозакристаллизованных алюминиевых сплавов. - М.: ВИЛС 1997. –332 с.
- 15 Захаров А.М. Промышленные сплавы цветных металлов. Фазовый состав и структурные составляющие. - М.: Metallurgia, 1980. – 256 с.
- 16 Добаткин В.И., Елагин В.И., Федоров В.М. Быстрозакристаллизованные алюминиевые сплавы. - М.: ВИЛС, 1995. – 341 с.

- 17 Воронцова Л.А. Алюминий и алюминиевые сплавы в электротехнических изделиях. — М.: Энергия, 1971. — 224 с.
- 18 Белов Н.А., Алабин А.Н., Карачарова Е.Г., Емелина Н.Б. О целесообразности легирования силуминов добавками титана и циркония. // Изв. вузов. Цветная металлургия. — 2009. — №4. — С.46-52.
- 19 Захаров М.В., Лисовская Т.Д.. Влияние различных элементов на электропроводность, твердость и температуру рекристаллизации алюминия марки АВ // Известия вузов «Цветная металлургия». — 1965. — № 3. — С 15-19.
- 20 Структура и свойства полуфабрикатов из алюминиевых сплавов: справ. / под ред. Елагина В.И., Ливанова В.А. - М.: Металлургия, 1984. - 408 с.
- 21 <http://solutions.3mruussia.ru> сайт тан алынган ақпарат
- 22 Мондольфо Л.Ф. Структура и свойства сплавов / пер. с англ. — М.: Металлургия, 1979. - 640 с.
- 23 Алабин А.Н. Исследование и разработка алюминиевых сплавов с добавкой циркония, упрочняемых без закалки: дисс. ... канд. техн. наук. — М.: МИСиС, - 2005. — 150 с.
- 24 Lae, P. Guyot, Sigli. C. Cluster dynamics in Al-Zr and Al-Sc alloys // Proceedings of the 9th International Conference on Aluminium Alloys. - 2004. — P.15-21.
- 25 Roynet J., Ryum N. Scandium in aluminum alloys // International Materials Reviews. — 2005. - № 1. - P.50-53.
- 26 Бокштейн Б.С. Диффузия в металлах. - М.: Металлургия, 1978. - 248 с.
- 27 Алюминий. Металловедение, обработка и применение алюминиевых сплавов: справочник / пер. с англ.- М.: Металлургия, 1972. — 664 с.
- 28 Федоров В.М. Новые жаропрочные алюминиевые сплавы, легированные малорастворимыми переходными металлами // Технология легких сплавов. — 1993. — №2. - С.67-81.
- 29 Белов Н.А., Алабин А.Н., Истомина-Кастровский В.В. и Степанова Е.Г. Влияние отжига на структуру и механические свойства холоднокатаных листов
- 30 Toropova L.S., Eskin D.G., Kharakterova M.L. and Dobatkina T.V. Advanced Aluminum Alloys Containing Scandium. Structure and Properties, Amsterdam, OPA, 1998. - P 188.
- 31 Marquis E.A., Seidman D.N. Nanoscale structural evolution of Al₃Sc precipitates in Al (Sc) alloys // Acta mater. — 2001. - №49. - P.1909-1919.
- 32 Seidman D.N., Marquis E.A., Dunand D.C. Precipitation strengthening at ambient and elevated temperatures of heat-treatable Al(Sc) alloys. // Acta mater. - 2002. - №50. - P. 4021-4035.
- 33 Дриц М.Е., Торопова Л.С., Быков Ю.Г., Гущина Ф.Л., Елагин В.И., Филатов Ю.А. Метастабильная диаграмма состояния системы Al-Sc со стороны, богатой алюминием // Изв. АН СССР. Металлы. — 1983. — №1. — С. 179-182.
- 34 Макаров Г.С. Тенденции в применении продукции из алюминия и его сплавов в России // Цветные металлы. 2007. № 5. С. 82 — 89
- 35 Новиков И.И. Горячеломкость цветных металлов и сплавов. М.: Наука, 1966. - 299с.
- 36 ГОСТ 4784 — 97. Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. М.: ИПК Изд-во стандартов. 2001

37 Плавка и литье алюминиевых сплавов: Справочное руководство / Под ред. В.И. Добаткина. М.: Metallurgia. 1983. - 352с.

38 Алюминий. Свойства и физическое металловедение: Справ. изд. / У.У. Энтони, Ф.Р. Элиот, М.Д. Болл, под ред. Дж. Е. Хэтча / Пер. с англ. М.: Metallurgia. 1989. - 324 с.

39 Металловедение алюминия и его сплавов: Справ. изд. / А.И. Беляев, О.С. Бочвар и др. М.: Metallurgia. 1983. - 280 с.

40 Смагулов Д.У., Кошимбаев Б.Ш. Разработка теоретических основ создания новых металлических материалов и технологии их получения и обработки // Вестник КазНТУ. – 2009. – с. 35 – 41

42 Белов Н.А., Алабин А.Н., Прохоров А.Ю. Влияние добавки циркония на прочность и электросопротивление холоднокатаных алюминиевых листов // Изв. вузов. Цветная металлургия. 2009. - № 4.

43 Толеуова А.Р., Аменова А.А., Ешмолдаева А.Б., Белов Н.А., Смагулов Д.У. Расчет изотермический разрезом диаграммы Al–Cu–Mn–Zr–Fe– Si // Известия Национальной Академии наук РК. Серия геологии и технических наук. – 2011, ноябрь – декабрь. - № 6 (434). - С. 82–85.

44 Добаткин В.И., Елагин В.И., Федоров В.М. Быстрозакристаллизованные алюминиевые сплавы. – М.: ВИЛС, 1995. - С. 341.

45 Добаткин В.И., Федоров В.М., Бондарев Б.И. и др. Гранулируемые алюминиевые сплавы с высоким содержанием переходных металлов // Технология легких сплавов. – 2004.- №3. - С. 22–29.

46 Комбаев К.К., Смагулов Д.У., Аменова А.А., Достоева А.М. Алюминий қорытпасын микродоғалық тотықтыру // Республиканский журнал «Труды университета». – -2013. - № 3(52) – С.33-36.

47 Достоева А.М., Смагулов Д.У., Белов Н.А., Мухамедина Т.М. Құрамында Zr бар алюминий қорытпаларының ыстық иленген беттерінің қаттылығымен электр кедергісіне күйдірудің әсері // Сборник трудов Международной научно-практической конференции «Нанотехнологии в материаловедении – новый вектор индустриализации Казахстана», посвященной 85-летию юбилею академика А.К. Омарова. – Алматы, - 2014. - С.26-27.

48 Lefebvre W., Danoix F., Hallem H., Forbord B., Bostel A., Marthinsen K., Precipitation kinetic of Al₃(Sc,Zr) dispersoids in aluminium // J. Alloys Compd.-2009. -№ 470. - P. 107-110.

49 Knipling K., Dunand D., Seidman D. Precipitation evolution in Al-Zr and Al-Zr-Ti alloys during isothermal aging at 375-425 °C // Acta Mater. - 2008. - № 56.- P. 114-127.

50 Белов Н.А., Алабин А.Н., Прохоров А.Ю., Скворцов Н.В. Влияние промежуточного отжига на электросопротивление проволоки низколегированных алюминиевых сплавов системы Al–Zr–Fe–Si // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2012. – № 4. – С.14-19.

51 Белов Н.А. Фазовый состав алюминиевых сплавов. - М.: Издательский Дом МИСиС, 2009. – 392 с.

52 Belov N.A. and Alabin A.N. “Microstructure and mechanical properties of Al-Cu-Mn cold rolled sheet alloys” in «Aluminium Alloys: Their Physical and

Mechanical Properties” / ed. J.Hirsch. B.Scrotzki and G.Gottstein. Proc. ICAA11.- Germany Aachen: DCM., 2008, october -08. - P. 1653-1659.

53 Толеуова Р.А Теоретические и экспериментальные исследования фазового состава, структурных превращений в алюминиевых сплавах нового поколения на базе системы Al–Cu –Mn –Zr: дис. ... доктора PhD – Алматы, 2013. - 137 с.