

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ БІЛІМ ЖӘНЕ ҒЫЛЫМ МИНИСТРЛІГІ

Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті

Металлургия және өнеркәсіптік инженерия институты

Инженерлік физика кафедрасы

Сатпаева Лимара Қайратқызы

Беріктігі жоғары титан қорытпаларын термиялық өндеудің оптималдық
режимдерін табу

МАГИСТРЛІК ДИССЕРТАЦИЯ

7М07103 - Материалтану және жаңа материалдар технологиясы

Алматы 2021

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ БІЛІМ ЖӘНЕ ҒЫЛЫМ МИНИСТРЛІГІ

Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті

Металлургия және өнеркәсіптік инженерия институты

ӘОЖ 621.785.369:669.017

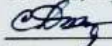
Қолжазба құқығында


Сатпаева Лимара Қайратқызы


Магистр академиялық дәрежесін алу үшін дайындалған

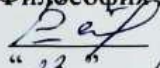
МАГИСТРЛІК ДИССЕРТАЦИЯ

Диссертация атауы	Беріктігі жоғары титан қорытпаларын термиялық өңдеудің оптималдық режимдерін табу
Дайындау бағыты	7M07103 - Материалтану және жаңа материалдар технологиясы

Ғылыми жетекші,
т. ғ. д, профессор
 Д.У. Смагулов
“22” 06 2021ж.

Пікір беруші,
асс.профессор, PhD доктор
 А.О. Омарбекова
“22” 06 2021ж.

Норма бақылаушы,
PhD доктор
 А.Б.Телешева
“17” 06 2021ж.

ҚОРҒАУҒА ЖІБЕРІЛДІ
«ИФ» кафедра меңгерушісі
Философия докторы (PhD)
 Р.Е.Бейсенов
“23” 06 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

«ИФ» кафедра меңгерушісі

Философия докторы (PhD)

Р.Е.Бейсенов Р.Е.Бейсенов

“23” 06 2021 ж.

**Магистрлік диссертация орындауға
ТАПСЫРМА**

Магистрант Сатпаева Лимара Қайратқызы

Тақырыбы : Беріктігі жоғары титан қорытпаларын термиялық өңдеудің оптималдық режимдерін табу

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

Аяқталған жұмысты тапсыру мерзімі 2021 жылғы "28" маусым

Магистрлік диссертацияның бастапқы берілістері: Диссертация алды тәжірибелік жұмыстардан алынған материалдар; ғылыми техникалық дерек көздері.

Магистрлік диссертацияда қарастырылатын мәселелер тізімі

а) титан негізіндегі қорытпалардың фазалық диаграммаларын есептеу және тұрғызу;

б) Al-Nb және Al-Mo лигатураларын қолдана отырып, бір фазалық γ -қорытпасын дайындау әдісін әзірлеу;

в) Ti-Al-Nb-Mo системасы қорытпасын термиялық өңдеудің оптимал режимдерін жасау.

Ұсынылатын негізгі әдебиет:

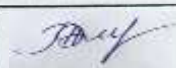
1 Schwaighofer E., Clemens H., Mayer S., Lindemann J., Klose J., Smarsly W., Güther V. Microstructural design and mechanical properties of a cast and heat-treated intermetallic multi-phase γ -TiAl based alloy // Intermetallics, 2014.- V.44.- P.128-140.

2 Ночовная Н.А., Панин П.В., Кочетков А.С., Боков К.А. Современные жаропрочные сплавы на основе гамма-алюминиды титана: перспективы разработки и применения // Металловедение и термическая обработка металлов, 2014.-№ 7.- С.23-27.

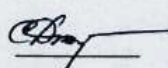
Магистрлік диссертация дайындау
КЕСТЕСІ

Бөлімдер атауы, қарастырылатын мәселелер тізімі	Ғылыми жетекші мен кеңесшілерге көрсету мерзімдері	Ескерту
Ғылыми - өндірістік мәліметтерге шолу	Желтоқсан 2019 жыл	
Зерттеу әдістері	Қыркүйек 2020 жыл	
Ғылыми - зерттеу нәтижелері	Қаңтар 2021 жыл	
Эксперименттік зерттеулер	Мамыр 2021 жыл	

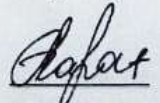
Аяқталған магистрлік диссертация бөлімдеріне кеңесшілер мен норма бақылаушының қойған қолтаңбалары

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

Ғылыми жетекші

 Д.У. Смагулов

Тапсырманы орындауға алған білім алушы

 Л.Қ. Сатпаева

Күні

"23" 06 2021 ж.

АҢДАТПА

Магистрлік диссертацияда титан негізіндегі Ti – Al – Nb – Mo және Ti – Al – V – Mo системаларының фазалық диаграммалары есептелді және тұрғызылды. Al-Nb және Al-Mo лигатураларын қолдана отырып, бір фазалық γ -қорытпасын дайындау әдісі әзірленді. Титан қорытпасының құйма күйіндегі фазалық құрамы, құрылысы мен қасиеттері зерттелді. Ti-Al-Nb-Mo системасы қорытпасын термиялық өндеудің оптимал режимі жасалды.

АННОТАЦИЯ

В магистерской диссертации были рассчитаны и построены фазовые диаграммы систем на основе титана Ti - Al - Nb - Mo и Ti - Al - V - Mo. Был разработан метод приготовления однофазных γ -сплавов с использованием лигатур Al-Nb и Al-Mo. Исследованы фазовый состав, структура и свойства титанового сплава в слитке. Разработан оптимальный режим термической обработки сплава системы Ti-Al-Nb-Mo.

ANNOTATION

In the master's thesis, the phase diagrams of systems based on titanium Ti - Al - Nb - Mo and Ti - Al - V - Mo were calculated and constructed. A method was developed for the preparation of single-phase γ -alloys using Al-Nb and Al-Mo ligatures. The phase composition, structure and properties of a titanium alloy in an ingot have been investigated. The optimal mode of heat treatment of the alloy of the system Ti-Al-Nb-Mo has been developed.

МАЗМҰНЫ

КІРІСПЕ		
1	Ғылыми - өндірістік мәліметтерге шолу	12
1.1	Өнеркәсіптік титан қорытпалары	12
1.2	Легірлеуші элементтердің титан қорытпаларының құрылысы мен қасиеттеріне әсері	15
1.3	Гамма-қорытпалар туралы мәліметтер	18
2	Зерттеу әдістері	21
2.1	Бастапқы материалдар	21
2.2	Al-Nb және Al-Mo лигатураларын дайындау әдістемесі	22
2.3	Титан негізіндегі гамма қорытпаларын дайындау	22
2.4	Титан қорытпаларынан жасалған үлгілерді термиялық өңдеу әдістемесі	22
2.5	Қорытпалардың фазалық құрамы мен құрылымын зерттеу әдістері	23
2.6	Титан қорытпаларынан жасалған үлгілердің механикалық қасиеттерін анықтау әдістемесі	25
2.7	Көп компонентті системалардың фазалық диаграммаларын компьютерлік есептеу әдістемесі	27
3	Ғылыми - зерттеу нәтижелері	31
3.1	Ti – Al – V – Mo системасының фазалық диаграммасының изотермиялық қимасы	31
3.1.1	Ti – Al – V – Mo системасының фазалық диаграммасының политермиялық қимасы	32
3.1.2	Ti – Al – V – Mo системасы қорытпасының фазалық құрамы мен құрылысы	33
3.2	Ti – Al – Nb – Mo системасының фазалық диаграммасының изотермиялық қимасы	34
3.2.1	Ti – Al – Nb – Mo системасының фазалық диаграммасының политермиялық қимасы	35
3.2.2	Ti – Al – Nb – Mo системасы қорытпасының фазалық құрамы мен құрылысы	37
4	Тәжірибелік зерттеулер	40
4.1	Al-Nb және Al –Mo негізіндегі лигатураларды дайындау әдістемелерін жасау	40
4.2	Ti – Al – Nb – Mo системасы қорытпаларын термиялық өңдеудің оптималды режимін табу	46
ҚОРЫТЫНДЫ		
ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ		

КІРІСПЕ

Қазіргі кезде титан қорытпаларының көмегінсіз заманауи машина жасаудың дамуын және одан әрі жетілуін елестету қиын. Жақын арада авиация саласында титан қорытпаларын тұтынудың екі есе өсуімен қатар кеме жасау, медицина, атом және химия өнеркәсібі сияқты басқа салаларда да титан жартылай фабрикаттарына сұраныстың артуы болжанып отыр [1-5].

Титан қорытпаларының басқа материалдардан артықшылығы жоғары беріктік және жоғары коррозияға төзімділікпен үйлескен меншікті ыстыққа төзімділігі. Сонымен қатар, титан мен титан қорытпалары жақсы дәнекерлік және парамагниттік қасиеттерге ие.

Бүгінгі күнге дейін әр түрлі мақсаттағы бірнеше жүз эксперименттік композициялар және жүзден астам өндірістік титан қорытпалары жасалды. Олардың құрылымы мен қасиеттерін анықтауға көптеген зерттеулер арналған, олар бірнеше рет қорытпалардың механикалық қасиеттері мен химиялық құрамы арасында сандық байланыс орнатуға тырысқан. Алайда, олар қорытпалардың қасиеттерінің фазалық құрамына және құрылымдық күйіне жоғары сезімталдығына байланысты, сондай-ақ легірлеуші элементтер мен қоспалардың құрамының ауытқы салдарынан белгілі нәтиже ала алмады.

Жаңа титан қорытпалары және олардан жасалған бұйымдар қажетті технологиялық және эксплуатациялық қасиеттерге ие болуы керек, атап айтқанда, жоғары беріктік, икемділік, ыстыққа беріктік және төзімділік. Легірлеу, термиялық және термомеханикалық өңдеу нәтижесінде көптеген өндірістік қорытпалардың, соның ішінде титанға негізделген қасиеттердің қажетті жиынтығын алуға болатыны белгілі. Алайда, бұл мәселені шешудің қиындығы мынада: темір мен никельге негізделген көптеген өндірістік қорытпалардан айырмашылығы, титан қорытпалары легірлеуші элементтердің концентрациясына, термиялық және термомеханикалық өңдеу режимдеріне жоғары құрылымдық сезімталдықпен сипатталады. Титан негізіндегі қорытпалардың құрылымдық-фазалық құрамы мен қасиеттерінің көп факторлы тәуелділігіне байланысты, титан қорытпалары компоненттерінің оларды сұйық-қатты күйінде дайындау және кейіннен салқындату сатысында физикалық-химиялық өзара әрекеттесуінің ерекшеліктерін жан-жақты зерттеу қажет. Бұл мәселені титанға негізделген көп компонентті жүйелердің фазалық диаграммаларын құру және олардың құрамы мен температурасына байланысты фазалық түрлендіру заңдылықтарын зерттеу арқылы шешуге болады. Фазалық диаграммаларды тұрғызу, сонымен қатар, титан қорытпалары мен олардан жасалған бұйымдарды алдын-ала және түпкілікті өңдеудің оптималды режимдерін, соның ішінде олардың берілген құрылымдық-фазалық күйі мен қасиеттерін қалыптастыру үшін термиялық және деформациялық әсердің әртүрлі түрлерін орнатуға мүмкіндік береді.

Жұмыстың өзектілігі. Жабдық салмағының төмендеуін, қышқылға төзімділігін, машина бөлшектері мен механизмдерінің коррозияға және ыстыққа төзімділігін жоғарлататын титан және оның қорытпаларынан жасалған бұйымдардың жоғары өнімділік сипаттамалары, оларды аэроғарыш өнеркәсібі, Қазақстан Республикасының мұнай-газ өндірісі және химия өнеркәсібінде пайдалануға мүмкіндіктер ашады. Жақын болашақта, әлемдік нарықта жоғары сапалы титан қорытпаларына қажеттілік тек арта түседі, ал олардың сапасына қойылатын талаптар үздіксіз өсетіні анық. Сондықтан отандық шикізаттан жаңа буынның жоғары сапалы титан қорытпаларын жасау мен өндеудің ғылыми негіздерін жасау өзекті мәселеге айналып отыр.

Перспективалы титан қорытпаларын әзірлеу үшін көп компонентті қорытпаларды легірлеудің жаңа принциптерін, жұмыс температурасының аралығын кеңейту, ыстыққа төзімділікті қамтамасыз ету, агрессивті ортада коррозияға төзімділікті арттыру мақсатындағылыми негізделген термиялық өңдеу режимдерін іздеуді жүзеге асыру қажет. Осы бағыттағы ғылыми-зерттеу жұмыстарын құрастыру мен ұйымдастырудағы негізгі көзделген мәселе - легірлеуші элементтердің оптималды кешенін таңдаумен байланысты еңбек шығындарын азайту және олардан жасалған бұйымдарды термиялық өндеудің оңтайлы технологияларын жасау. Қорытпалардың эксплуатациялық қасиеттерін және көп компонентті системаға көшулерін қамтамасыз ету үшін, қорытпаларды стандартты әдіс-тәсілдермен жасау қиынға соғады. Оны шешу компьютерлік заманауи есептеу әдістерін және бағдарламалық қамтамасыз етуді (мысалы, Thermo-Calc, TTTIAL мәліметтер базасы) пайдалану кезінде, сұйық-қатты күйдегі көп компонентті жүйелердегі және кейіннен қорытпаларды салқындататын физикалық және химиялық өзара әрекеттесу заңдылықтарын зерттеу негізінде ғана мүмкін болады.

Жұмыстың жаңалығы. Таза компоненттер мен металл фазаларының термодинамикалық және физико-химиялық қасиеттерінің мәліметтер базасын қолдана отырып, компьютерлік есептеудің заманауи әдістерінің көмегімен алғаш рет көп компонентті титан негізіндегі қорытпалардың фазалық құрамы мен құрылымының түзілу заңдылықтары зерттелді, олардың негізінде фазалық диаграммалар құрылды, γ -фазаның температуралық-концентрациялық аймақтары анықталды және термиялық өндеу оптималды режимі ұсынылды.

Жұмыстың мақсаты: компьютерлік есептеу және талдау әдістерінің көмегімен титан негізіндегі көп компонентті қорытпалардың құрылымдық-фазалық күйін сандық талдау және оларды термиялық өндеудің оптималды режимдерін жасау.

Қарастырылатын мәселелер:

Компьютерлік Thermo-Calc есептеу программасының көмегімен титан негізіндегі Ti – Al – Nb – Mo және Ti – Al – V – Mo системаларының

фазалық диаграммалары есептеліп, олардың политермиялық және изотермиялық қималарын тұрғызу.

Аталған фазалық диаграммалардың политермиялық және изотермиялық қималарын зерттеу нәтижесінде легірлеуші элементтердің Al, Nb және Mo оптимал концентрацияларын және бір фазалы гамма-қорытпасының оптимал құрамын анықтау.

Al-Nb және Al-Mo лигатураларын қолдана отырып, бір фазалық γ -қорытпасын дайындау технологиясын игеру.

Ti-Al-Nb-Mo системасы қорытпасының термиялық өңдеудің оптималды режимдерін жасау.

Титан қорытпасының термиялық өңдеуден кейінгі фазалық құрамы мен құрылысын және қасиеттері зерттеу.

1 ҒЫЛЫМИ-ӨНДІРІСТІК МӘЛІМЕТТЕРГЕ ШОЛУ

1.1 Өнеркәсіптік титан қорытпалары

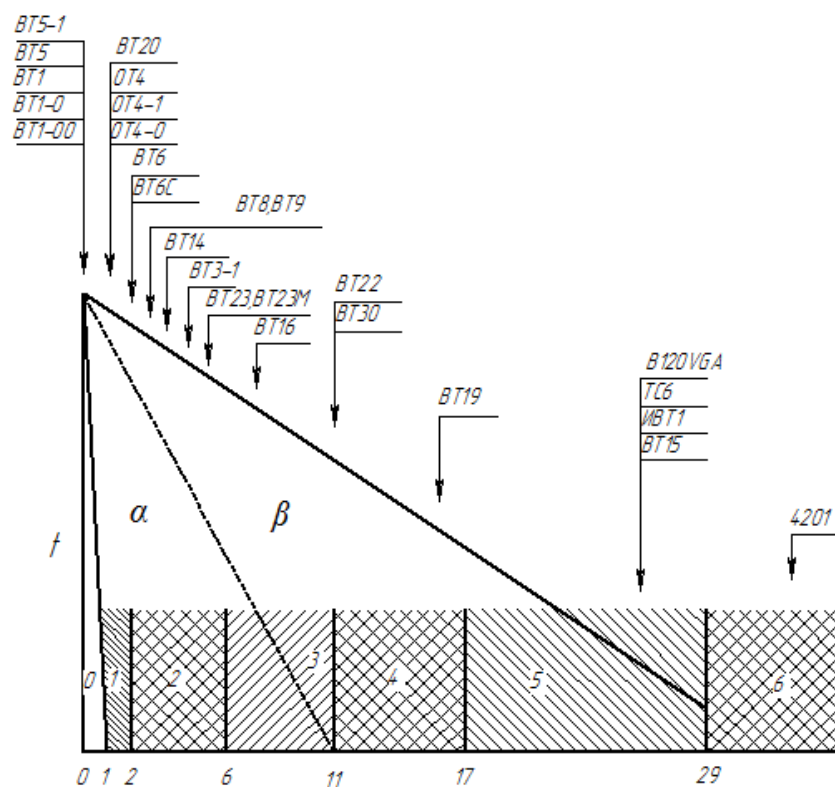
Қазіргі таңда титан негізіндегі қорытпалар маңызды құрылымдық материалдардың біріне айналды. Оларды қолдану жоғары меншікті беріктік пен коррозияға төзімділіктің үйлесімін қажет ететін технология салаларында тиімді: кеме жасау, авиация, химия өнеркәсібі және т.б. Бүгінгі күнге дейін зерттелген титан қорытпаларындағы фазалық өзгерістер оның механикалық және термиялық өңдеу технологиясының негізінде жатқандығы сөзсіз, бірақ белгілі бір жартылай фабрикаттар мен өнімдердің өндіріс заңдылықтарын үнемі зерттеп, егжей-тегжейлі бақылау үнемі қажет еткендігін және әрқашан қажет ететіндігін мойындауымыз керек. Қорытпаның құрылымы мен қасиеттері, сондай-ақ термомеханикалық өңдеудің әр түрлі түрлері соңғы катаю процедурасына шешуші әсер етуі мүмкін.

Осы қорытпаларды қолданудың жауапты салалары термиялық және термомеханикалық өңдеудің жаңа режимдерін дамытуға байланысты олардың эксплуатациялық қасиеттерін одан әрі жоғарылатуды талап етеді, бұл қанағаттанарлық пластикалық және тұтқырлық сипаттамалары бар өнімдерде 1400 МПа дейінгі беріктік деңгейін алуға мүмкіндік береді.

Механикалық және технологиялық қасиеттердің ерекшеліктеріне сәйкес титан қорытпаларын үш топқа бөлуге болады:

- пластикалық қасиеттері жоғары (термиялық беріктендірілмейтін) конструкциялық қорытпалар;
- беріктігі жоғары (термиялық өңделетін) конструкциялық қорытпалар;
- ыстыққа төзімді қорытпалар.[1]

Беріктігі жоғары титан қорытпаларынан күрделі құрылымдар жасау кезінде механикалық қосылыстар дәнекерленген қосылыстармен ауыстырылады. Бұл жағдайда автоматтандырылған аргон-доға және электронды-сәулелік дәнекерлеу қолданылады. Ті-β-тұрақтандырғыштар диаграммасында [2] (1 Сурет) құрылымы ($\alpha+\beta$) кеңінен қолданылатын беріктігі жоғары титан қорытпаларының қатары ұсынылған.



* β -тұрақтандырығыш элементтер, Мо эквиваленті (% (масс.) бойынша)

1 Сурет- Титан қорытпаларының жіктелуі: 0-6-қорытпалар класы [2]

Жоғарыда келтірілген қорытпалардың негізгі көрсеткіштері 1-кестеде келтірілген.

1 Кесте - Екі фазалы ($\alpha+\beta$), беріктігі жоғары титан қорытпаларының негізгі көрсеткіштері [3]

Қорытпа	Химиялық құрамы, масса %	σ_y , МПа	Максималдық қолдану температурасы, °С	Жартылай фабрикат түрі
BT6	Ti-6Al-4V	900-950	350	Қаңылтырлар, тақтайшалар, поковкалар, штамповкалар
BT22	Ti-5Al-5V-5Mo1Cr-1Fe	≥ 1080	350	Үлкен өлшемді поковкалар, штамповкалар
BT23	Ti-5,5Al-2Mo4,5V-1Cr-0,6Fe	≥ 1100	350	Қаңылтыр, лента, фольга, тақталар, поковкалар.

BT6 әмбебап титан қорытпасы 350°C дейінгі температурада шексіз жұмыс істейтін желдеткіш пен төмен (орташа) қысымды компрессордың бөлшектері мен тораптарына (дискілер, қалақшалар, статор бөлшектері, сақиналар, корпустық бөлшектер) ұсынылады. Қорытпа жоғары технологиялық, химиялық құрамның біркелкілігімен, кернеу концентраторларына сезімталдықтың төменділігімен және көп мақсатты қолдану мүмкіндігімен ерекшеленеді. Металлургиялық кәсіпорындар BT6 қорытпасынан жасалған илектелген шыбықтар, дискілерді қалыптау, жылжымалы сақиналар, пышақтарды қалыптау, қаңылтыр түріндегі жартылай фабрикаттарды қолданысқа жібереді.[3]

BT22 қорытпасы (Ti-5Al-5V-5Mo1Cr-1Fe) - критикалық концентрациядағы қарастырылатын қорытпалардың біріншісі (β - тұрақтандырғыштардың саны 11,5% Mo-ға тең). Ол термиялық өңдеу кезінде тиімді қатаяды және ол ИЛ-86, ИЛ-96, ИЛ-76 ұшағының шасси конструкцияларында қолдануға мүмкіндік беретін жеткілікті пайдалану қасиеттеріне ие. Қорытпада β -тұрақтандырғыштардың көп мөлшерінің болуы оны жоғары шынықтыру тереңдігімен және 150 мм дейінгі аймақты тиімді беріктендірумен қамтамасыз етеді. Бұл дайындамада қатты термиялық өңдеуді жүргізуге, содан кейін бөлшекті механикалық өңдеу арқылы жасауға мүмкіндік береді. BT22 қорытпасының басқа β - қорытпаларынан айырмашылығы, оның құрамында алюминий мөлшері жоғары және соғу, штамптау, штангалар түрінде 350 ° C дейінгі температурада жұмыс жасай алады. [4-6]

BT23 қорытпасы-қолдану температурасы -196-дан +400°C-қа дейін жететін беріктігі жоғары дәнекерленетін титан қорытпасы. Жартылай фабрикаттардың барлық дерлік түрлері осы қорытпадан дайындалады.

BT23 қорытпасы "Астрон" ғарыш аппаратының күштік конструкцияларында сәтті қолданылды (2 Сурет). Осы қорытпадын жоғары ішкі қысыммен жұмыс істейтін, беріктік деңгейі 1200 МПа болатын дәнекерленген шар тәріздес баллондар дайындалған. Бе-200 гидроұшағының конструкцияларында BT23 қорытпасы құрастырмалы және монолитті конструкцияларды дайындау үшін, оның ішінде гидроаккумуляторларды дайындау үшін қолданылады. [6]



2 Сурет – "Астрон" ғарыш кемесі [7]

Мартенсит түріндегі беріктігі жоғары дәнекерленетін титан ($\alpha+\beta$) BT23 қорытпа Як-55, Су-31, Су-26М және басқа конструкцияларда сәтті қолданылды.

1.2 Легірлеуші элементтердің титан қорытпаларының құрылысы мен қасиеттеріне әсері

Легірлеуші элементтердің титан қорытпаларының қасиеттеріне әсерін түсіну үшін қорытпаларды легірлеудің негізгі бағыттарын қарастыру керек. Моисеевтің еңбектерінде [8, 9] легірлеуші элементтерді таңдау арқылы титан қорытпаларының эксплуатациялық сипаттамаларын жақсартудың негізгі бағыттары қарастырылған. Ол жұмыста, цирконий Zr және қалайы Sn сияқты легірлеуші элементтер титан негізінде қатты ерітінділер құрып, титанның жоғары температуралық беріктіктігін арттыру үшін кеңінен қолданылатыны көрсетілген. Бұл легірлеуші элементтер полиморфтік өзгеріс температурасына айтарлықтай әсер етпейтіндігі, сонымен қатар титан қорытпасының баяу деформациялануға төзімділігін арттыратыны атап көрсетілген.

α -фазасын тұрақтандыру үшін қорытпаларды Zr және Sn элементтерімен легірлейді. Қалайы Sn α -фазаның сынғыштық қасиетін азайтып, оның беріктігін жоғарлатуға мүмкіндік береді. Zr α -фазаның тұрақтануына қатысты бейтарап элемент болып табылады. Оның шамасы 5% - ға дейін болады және ол бөлме мен аралық температураларда қорытпалардың беріктігін арттырады.[10]

Алайда, легірлеудің мұндай тәсілі сөзсіз титан қорытпаларының пластикалық қасиеттерінің төмендеуіне алып келеді. Нәтижесінде жоғары

температурада пластикалық қасиеттері ең жоғары α -қорытпалары морт сынғыш бола бастайды.

β -тұрақтандыршы легірлеуші элементтерді α -тұрақтандырушы элементтермен бірге енгізу перспективалы бағыт болып табылады. Себебі ол қорытпалардың жоғары температуралық беріктіктің артуына ықпал етеді. Негізгі β -тұрақтандырғыштар молибден және ванадий болып табылады. Ал Nb сирек қолданылады. Cr, Fe, W сияқты элементтер β - фазада тұрақты ериді, титанмен эвтектоидтық қоспалар құрайды және қорытпалардың сынуға бейімділігін арттыратын элементтер болып табылады.[11]

Жоғары температуралық беріктіктің жоғарылауы β - фазасындағы диффузия коэффициентінің жоғарылауы болып табылады. Мұндай қорытпаға мысал ретінде Ti-Al-Mo-Nb ұсынуға болады. Бұл жағдайда бөлме температурасында иілгіштік шамамен 4% құрайды. Алайда, тығыздығы жоғары (Nb) металдарды легірлеуші элемент ретінде қолдану қорытпаның беріктігін төмендетуге ықпал ететінін атап өткен жөн.

Жоғары температурада қысқа мерзімді беріктікті арттыру үшін Mo қолданылса, тотығуды азайта отырып, бетті жоғары температурада тұрақтандыру үшін қорытпа Nb элементімен легірленеді. Si-нің аз мөлшері барлық температура диапазонында қорытпалардың беріктігін арттырады, бірақ шетелде оның мөлшері 0.5% - дан аспайды. Cr, Ni, Fe, Co элементтері қорытпаның жоғары температуралық қасиеттерін төмендететіндіктен, олардың мөлшері 0.01% -бен шектеледі.

СТ6 қорытпасының легірленуінің (Ti– 6,0% W– 4,1% Al– 3,5% Zr) механикалық қасиеттерге әсерін авторлар [12-16] еңбектерінде қарастырған. Вольфрам элементімен легірлеу нәтижесінде титан қорытпасының ыстыққа төзімділігі артады, бұл тордың электронды тығыздығының жоғарылауымен және атомаралық байланыстардың қатаюымен, сондай-ақ қатты ерітіндінің диффузиялық қозғалысының төмендеуімен байланысты. Қорытпаның кеңеюінің температуралық коэффициентін бақылау барысында, 600°C кезінде оның қарқынды өсуі байқалды, осылайша фазалық өзгерістердің өткеніде анықталды. 900°C температурада шынықтырылған қорытпаның қысқа мерзімді беріктігі 1400 МПа құрады, бұл мән 600 ° C температурада деформацияланғанан кейін 900 МПа дейін төмендеді. 650 ° C-тан жоғары температурада беріктіктің төмендеуі және пластикалық қасиеттерінің жоғарылауы байқалды. Қысқа мерзімді беріктік мәндері 2-кестеде келтірілген.

2 Кесте – СТ6 қорытпасының қысқа мерзімді беріктігі [15]

Құрамы	Беріктік шегі, МПа			Салыстырмалы ұзаруы, %		
	20°C	600°C	800°C	20°C	600°C	800°C
СТ6	1260/1140	768/700	261/365	11/17	21	50
2% W қосу	1350	824	301	3	17	39
2% Al қосу	1320	905	450	5	14	10

Әдеби дерек көздерге сүйенсек [17-22], қалыпты температурада жұмыс істеу үшін қыздырып өңделген немесе термиялық шындалған күйдегі екі фазалы ($\alpha+\beta$) қорытпалары ең оптималды материалдар болып табылады.

Екі фазалы ($\alpha+\beta$) қорытпаларының беріктік қасиеттері температураның жоғарылауына байланысты тез төмендейді. Сонымен бірге, қорытпалардың беріктігінің азаюы, β -фазаның шамасы неғұрлым көп болса, соғұрлым төмен температурада басталады. Сондықтан β -фазасының шамасын тұрақтандыру шараларын қолдану керек болады. Екі фазалы ($\alpha+\beta$) қорытпалардың беріктігі 500°C -тан жоғары температураларда едәуір тез төмендейтіндіктен, жоғары температураларда жұмыс істеу үшін, құрылысы α -фазаға негізделген псевдо-қорытпаларды (α -қорытпаларға ұқсас) қолдану ұсынылады. α - және α -қорытпаларға ұқсас қорытпаларының жылуға тұрақтылығы да өте жоғары болып келеді.

Титан алюминиді TiAl (бұдан әрі γ -қорытпалар) негізіндегі қорытпалардың болашағы зор. Оларды, ыстыққа төзімді материалдар ретінде, никель қорытпаларының орнына, жаңа буынды газ турбиналы қозғалтқыштардың қалақтарын жасау үшін қолдану қарастырылуда. Мұндай қорытпалардың қажетті технологиялық және эксплуатациялық қасиеттері, атап айтқанда беріктігі, пластикалық қасиеттері және ыстыққа төзімділігі жоғары болуы керек. γ -қорытпаларының фазалық құрамына легіріленген элементтер концентрациясы мен термиялық өңдеу режимдерінің шамалы өзгеруі өте үлкен әсер етеді. Сондықтан қорытпалардың қасиеттерін берілген дәрежеде қамтамасыз ету үшін, олардың фазалық құрамы мен құрылысын сандық деңгейде үнемі бақылап отыру қажет болады.

Титан қорытпалары үшін микролегірілеуші РЗМ қоспаларының ішінде ренийдің әсері ең тиімді болып табылады. Рений дәнекерлеу кезінде пайда болатын бастапқы кристал түйіршіктерінің өзгертетіні анықталған[23]. Сонымен бірге рений дәнекерлеуден кейінгі термиялық өңдеу кезінде пайда болатын тақтайша құрылымды кристалдарды ұсақтайтыны байқалады. Рениймен легіріленген α - қорытпаларға ұқсас қорытпаларда аса кең дамыған, ультра-жұқа кристалл-аралық шекаралар пайда болатыны және олар келесі термиялық өңдеуден кейін де сақталатыны көрсетілген. Мұндай құрылымдық өзгерістер титан қорытпаларының барлық механикалық қасиеттері комплексінің жақсаруын түсінуге мүмкіндік береді.

Легірілеуші элементтердің әсерлері әртүрі болып келеді. Сондықтан оларды қолданудың өздеріне тиісті тәсілдері болуы керек. Кейбір қоспалар (мысалы: иттрий, эрбий) қорытпалардың құрылысын құрайтын кристал түйіршіктерін ұсақтайды және қоспа элементтердің атомдарын түйіршікаралық және фазааралық шекараларда топтастырады. Ал басқалары (мысалы: гафний, қалайы, цирконий) қайта кристалдану және іштей ыдрау процестерін қыйындатады. Осыған байланысты, титан қорытпаларының құрылысы мен қасиеттерін жақсартудың ең тиімді әдісі - комплексті микролегірілеу болуы мүмкін. Комплексті легірілеу қорытпалардың біртекті

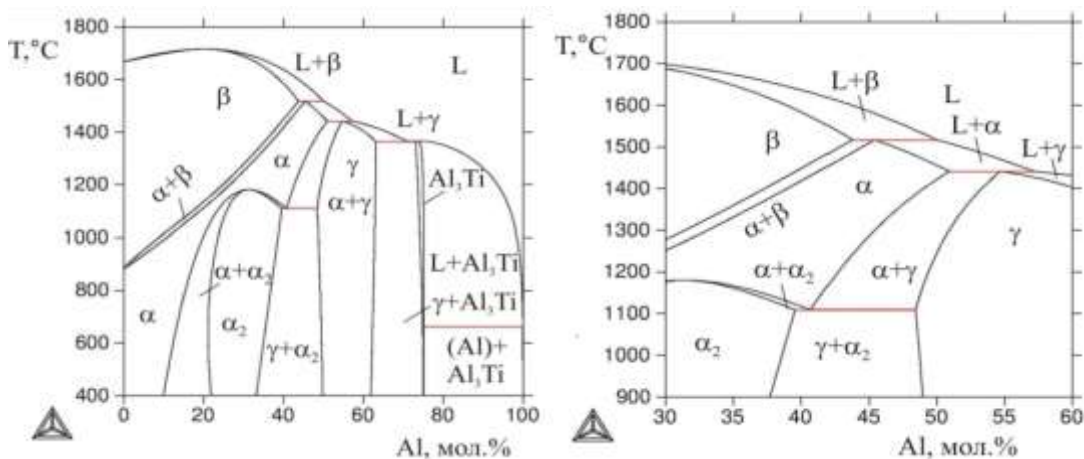
құрылымдық - фазалық күйін қалыптастыруға және балқыма-қосылыстың сенімділігін арттыруға.

1.3 Гамма-қорытпалар туралы мәліметтер

Зерттеу ұйымдары мен өнеркәсіптік кәсіпорындар гамма-қорытпаларды механикалық қасиеттері мен материалдың тығыздығы үйлесімділігінің ерекшелігіне байланысты жиі қолданады [24]. γ - қорытпаларының қарапайым титан қорытпаларымен салыстырғанда негізгі артықшылықтары: олардың ыстыққа төзімділігі, жоғары меншікті беріктігі мен серпімділік модулі, жоғары балқу температурасы, төмен диффузиялық коэффициенті, төмен тығыздығы, жоғары құрылымдық тұрақтылығы, тотығуға және коррозияға жоғары төзімділігі болып табылады [25].

Гамма қорытпалары автомобиль қозғалтқыштарының бөлшектерін дайындауда, соның ішінде Формула-1 классында сәтті қолданылды және сынақтардан өткен бірқатар компоненттері өндіріске жіберілді.

Гамма-қорытпалардың ерекшелігі - легірлеуші элементтер концентрациясының және термиялық өңдеу параметрлерінің шамалы өзгеруіне қорытпалардың фазалық құрамы мен механикалық қасиеттерінің жоғары сезімталдығы болып табылады [26, 27, 28-30]. Қорытпалардың эксплуатациялық сипаттамаларын қамтамасыз ету үшін, олардың қасиеттері фазалық құрамына және құрылысына байланысты екендігін қажетті сандық деңгейде бақылау қажет. Гамма қорытпаларын алудың ғылыми негізі титан - алюминий системасының фазалық диаграммасы болып табылады (3 Сурет).



3 Сурет - Ti–Al системасының фазалық күй диаграммасы [31].

Ti–Al системасының фазалық күй диаграммасында (3 Сурет) барлық қарастырылған қорытпаларда суыту кезінде фазалық құрамның қатты өзгеруіне алып келетін түрлендірулер жүруі тиіс. Атап айтқанда, 40 моль % Al бар β – қорытпада 1200 °C және 1400 °C-та тек бір α фазасы болады. Ал 600-1000 °C-та бұл қорытпа екі фазадан $\alpha_2 + \gamma$ тұрады. Мұнда α_2 фазасы

негізгі болып табылады, бірақ температура төмендегенде оның шамасы 87-ден 67 масс.% дейін азаяды. Құрамында 45% Al бар қорытпада γ фазасының шамасы жоғарыда аталған қорытпадағыдан көп. Бұл фаза 1200 °C температурадан бастап пайда бола бастайды, ал одан төмен температураларда негізгі фаза рөлін атқарады. Құрамында 50%Al бар қорытпа–1200°C және одан төмен температураларда бір γ фазадан тұрады[31].

1000°C төмен температурадағы барлық гамма-қорытпаларда (яғни, жұмыс температураларында) титан алюминиді TiAl болады. TiAl интерметаллиді балку температурасына (~ 1450 °C) дейін реттелген құрылысын сақтайды [32]. Алюминийдің концентрациясы жоғары болуына байланысты оның тығыздығы төмен (3,8 г/см³), ал дислокациялық құрылысының ерекшеліктеріне байланысты пластикалық қасиеттері 700°C-тан төмен температурларда шамамен <0,5% болады. 700°C температурадан жоғары температураларда интерметаллидтің пластикалық қасиеттері дислокациялардың қозғалысының жеңілдеуіне байланысты күрт артады.

Микроқұрылысына байланысты TiAl интерметаллидінің механикалық қасиеттері өте кең диапазонда өзгереді. Бөлме температурасында беріктік шегі $\sigma_b=350-580$ МПа, салыстырмалы қзаруы $\delta=0,5-1,5$ % болады. 20°C алюминидтің серпімділік модульдері $E= 75$ ГПа, $G=67$ ГПа тең. Гамма қорытпаларының кристалдануы кезінде орын алатын фазалық өзгерістердің нәтижесінде гамма фазасының пайда болуы жеті түрлі жолмен жүруі мүмкін (3 Кесте) [33].

3 Кесте – Тепе-теңдік жағдайда гамма қорытпаларының кристалдану жолдары [33]

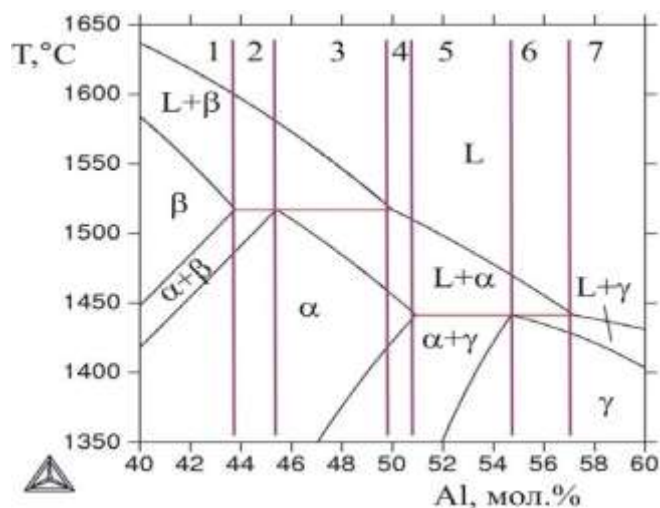
Кристалдану нұсқасы Al мөлшері, мол. %	Фазалар*	Кристалдану реакциялары		
		1	2	3
1 (<43,8)	β	$L \rightarrow \beta$		
2 (43,8–45,4)	$\alpha + \beta$	$L \rightarrow \beta$	$L + \beta \rightarrow \alpha$	
3 (45,4–50,0)	α	$L \rightarrow \beta$	$L + \beta \rightarrow \alpha$	$L \rightarrow \alpha$
4 (50,0–50,9)	α	$L \rightarrow \alpha$		
5 (50,9–54,7)	$\alpha + \gamma$	$L \rightarrow \alpha$	$L + \alpha \rightarrow \gamma$	
6 (54,7–57,2)	γ	$L \rightarrow \alpha$	$L + \alpha \rightarrow \gamma$	$L \rightarrow \gamma$
7 (>57,2)	γ	$L \rightarrow \gamma$		

Ескертпе - * кристалдану аяқталғаннан кейін

Бұл кестеден бірінші төрт нұсқада кристалдану процесінде TiAl алюминидтің пайда бола алмайтындығын көруге болады. Құрамында мөлшері 43,8 мол.%Al-тен аз қорытпалардың кристалдануы β -фазаның пайда

болуымен аяқталады. Мұндай қорытпаларды β - қатаю деп атайды. Қалған нұсқаларда кристалдану процесі α және γ фазаларының пайда болуымен аяқталады.

Бір фазалы γ -аймағына алюминий мөлшері жоғары (54,5 моль.% астам) қорытпалар ғана жатады.



4 Сурет – Гамма-қорытпаларының кристалдану аймағындағы Ti- Al диаграммасы [31]

Гамма қорытпаларында алюминийден басқа легірлеуші компоненттер бар (Nb, Cr, Mo, Zr, W, Re және т. б) [31,34,35, 36-39]. Сондықтан олардың фазалық құрамы мен құрылысын талдау үшін тиісті көп компонентті системалардың диаграммалары қажет [40,41]. Мұндай системалардың диаграммаларын графикалық әдіспен тұрғызу және оларды сандық талдау үшін қолдану мүмкін емес. Сондықтан осы мақсат үшін арнайы мамандандырылған компьютерлік бағдарламаларды, атап айтқанда, Thermo-Calc –ті қолданады [42].

Барлық конструкциялық материалдармен салыстырғанда γ -TiAl негізіндегі қорытпаларды 600-ден 850 °C-қа дейінгі температура аралығында қолдану аса тиімді екендігі анықталды. Олардың ыстыққа төзімділігі және басқа механикалық қасиеттері белгілі никель негізіндегі қорытпалармен тең дәрежеде немесе одан да жоғары екендігі көрсетілген [43]. Жалпы, TiAl интерметаллидіне негізделген қорытпалардың құрамы мен құрылысын термиялық өңдеу арқылы өзгерте отырып, олардың механикалық қасиеттерін одан әрі арттыруға әлі де мүмкіндік бар.

2 ЗЕРТТЕУ ӘДІСТЕРІ

2.1 Бастапқы материалдар

Гамма қорытпаларын дайындау үшін қайта балқытылғанан кейінгі иодидті титан ТИ-1 (4 Кесте), алюминий А995 (5 Кесте), Al-Nb және Al-Mo (6 Кесте) лигатурасы қолданылды.

4 Кесте – Титан ТИ-1 химиялық құрамы

Материал	Негізгі элементтердің құрамы, % масс.							
	Ti	қоспалар						
		Fe	C	O	Ni	N	Si	Cl
Иодидті титан	99,95	0,005	0,01	<0,01	0,005	<0,002	-	-

5 Кесте – Алюминий А995 химиялық құрамы

Материал	Негізгі элементтердің құрамы, % масс.							
	Al	қоспалар						
		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ti	Ga
А995	99,995	0,0015	0,0015	0,001	0,001	0,001	0,001	0,0030

6 Кесте – Al-Nb және Al-Mo лигатурасының химиялық құрамы

Лигатураның атауы	Негізгі элементтердің құрамы, % масс.		
	Al	Nb	Mo
Al-Nb	49,6	50,4	-
Al-Mo	53,3	-	46,7

7 Кесте – Ниобидің Nb химиялық құрамы

Nb	Негізгі элементтердің құрамы, % масс.								
	қоспалар								
	N	O	H	C	Si	Ta	Fe	Ti	W+Mo
Негізгі	<0,01	<0,01	<0,001	<0,01	<0,005	<0,01	<0,005	<0,005	<0,01

8 Кесте –Молибденнің Мо химиялық құрамы

Негізгіэлементтердіңқұрамы, % масс.						
Mo	қоспалар					
	Ni	Al+Fe	W	Si	Ca+Mg	K
Негізгі	<0,003	<0,014	<0,200	<0,003	<0,003	<0,010

Al-Nb және Al-Mo лигатураларын дайындау үшін алюминий А995 ГОСТ 11069-74, ниобий Nb ГОСТ 16099-80 (7 Кесте) және молибден МЧ ТУ 48-19-245-84 (8 Кесте) қолданылды.

2.2 Al-Nb және Al-Mo лигатураларын дайындау әдістемесі

Al-Mo және Al-Nb лигатурасы "Arcast Arc200" зертханалық вакуумдық доғалы пеште дайындалды. Al-Mo лигатурасын дайындау үшін 50%-дан таза алюминий мен молибден қолданылды. Шихта түйіршіктерден тұрады. Балқығанға дейінгі вакуум $1 \cdot 10^{-4}$ мм сын.бағ. Пеште вакуум алу уақыты 1 сағат. Аргонның қысымы 250-300 мм сынап бағанасымен, ток күші 250-500 А, кернеуі 25-30 В. Аударуға дейін балқыту уақыты 2 минут. Қызып кеткен кезде алюминий балқытылғаннан кейін молибден ери бастайды. Балқытылған металл ваннасың жақсы араласуы үшін пеш алты рет аударылып, одан кейін металл қалыптарға (кокильдерге) құйылды. Al-Nb лигатурасын дайындау үшін де жоғарыда аталған процесстер қайталанды.

2.3 Титан негізіндегі гамма қорытпаларын дайындау

TNM типті қорытпа Arcast Arc200 зертханалық вакуумдық доғалы мыс салқындатылған пешпен дайындалды. Өндіріс үшін иодидті титан ТИ-1, Nb-Al (50 - 50) және Mo-Al (50-50) лигатуралары, алюминий қолданылды. Шихта түйіршіктерден тұрады. Балқығанға дейінгі вакуум $1 \cdot 10^{-3}$ мм сынап бағанасымен. Пеште вакуум алу уақыты 1 сағат. Аргонның қысымы 250-300 мм сын.бағ., ток күші 250-500 А, кернеуі 25-30 В. Аударуға дейін балқыту уақыты 2 минут. Балқытылған металл ваннасың жақсы араласуы үшін пеш алты рет аударылып, одан кейін металл ұзындығы 70 мм және диаметрі 12,5 мм мыс қалыпқа құйылды.

2.4 Титан қорытпаларынан жасалған үлгілерді термиялық өңдеу әдістемесі

Гамма қорытпалардың құйылған үлгілерін жоғары температурада газостатикалық өңдеу "Композит" ААҚ газостатында келесі режим бойынша жүргізілді: температура 1250°C, қысым 170 МПа, ұстау уақыты 4 сағат. 1250°C температурада вакуумдық қыздырып өңдеу графитті жылытқышы

бар вакуумдық төзімді пеште жүргізілді. Вакуум $5 \cdot 10^{-5}$ мм сынап бағанасын құрады. 800°C температурада қыздырып өңдеу ауа атмосферасында муфельді пеште жүргізілді. Үлгілердің сыртқы түрінде ешқандай өзгерістер болған жоқ.

Қыздырып өңделген TNM қорытпасының құрылысы негізінен $\gamma + \alpha_2$ колонияларынан және өте аз мөлшерде β фазадан тұрады. γ -қорытпалардың құрылысында β фазаның аса көп болуы қорытпалардың механикалық қасиеттеріне теріс әсер тигізеді. Олардың саны мен морфологиясы термиялық өңдеу арқылы түзетіледі. Ол пішінді құймаларға қатысты, әдетте, газ-статикалық престеумен біріктіріледі. Газ-статикалық престеу құю ақауларын жоюға және қорытпалардың механикалық қасиеттерін жақсартуға мүмкіндік береді [44].

Құймалар SNOL – 1,6.2,3.0,8/9 – M1 муфельді электр пештерінде (температураны ұстап тұру дәлдігі шамамен 10°K) термиялық өңделуден өткізілді. Үлгілер 500 -ден 1400°C -қа дейінгі температуралық аралықта көп сатылы режимде, 100°C қадаммен қыздырылып, әр кезеңде 3 сағат бойы ұсталды. Оптималды термиялық өңдеу режимі эксперименттік зерттеулердің нәтижелері бойынша анықталды. Әрбір қыздырып өңдеу режимі үшін үлгілердің Бринелл шкаласы бойынша қаттылығы және Виккерс шкаласы бойынша микроқаттылығы өлшенді.

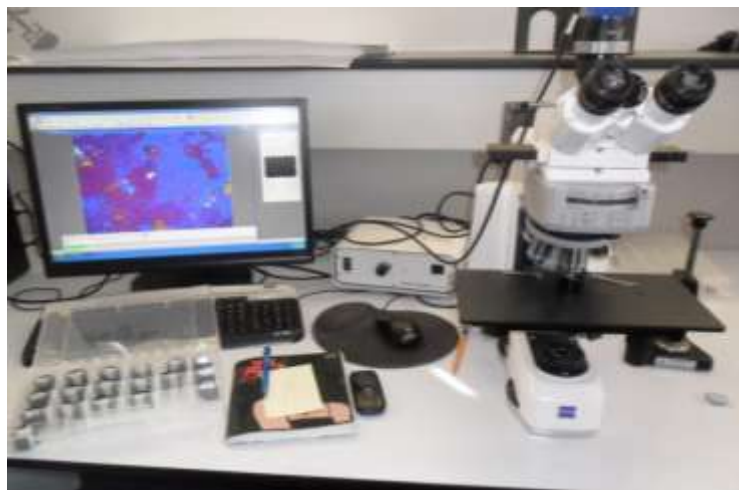
2.5 Қорытпалардың фазалық құрамы мен құрылымын зерттеу әдістемесі

Құрылымдық зерттеулер оптикалық (ОМ), сканерлеу (СЭМ) және мөлдір электронды микроскоптар (МЭМ) көмегімен жүргізілді. Шлифтерді дайындау үшін механикалық (BUEHLER Phoenix 4000) және электролиттік жалтырат өңдеу әдістері (5 Сурет) қолданылды. Қорытпадағы түйіршіктердің шекараларын анықтау үшін, содан кейін үлгілердің түйіршіктерінің орташа мөлшерін анықтау үшін 2,5%-ды HBF_4 ерітіндісінде анодтау процесі қолданылды.



5 Сурет –Тегістеп-жалтырата өңдеуге арналған BUEHLER Phoenix станоктары

Микроқұрылымды анықтау плавик қышқылының 1% ерітіндісімен шлифтердің бетін өңдеу арқылы жүргізілді. Қорытпалардың фазалық құрамы мен құрылымын зерттеу оптикалық микроскопта (6 Сурет), JEOL JXA-8230 анализаторы бар электронды растрлық сканерлеу микроскопында зерттелді. Соңғы жағдайда максималды фазалық контрасты алу үшін шағылысқан электронды режим де, жәнеде үлкейту кезінде максималды жақындатудың (20000 есеге дейін) қайталама электронды режимі де пайдаланылды.



6 Сурет –АХЮ Zeiss – А.1 оптикалық микроскобы

Сондай-ақ қорытпалардың микроқұрылысы Leica (Германия) оптикалық микроскопында зерттелді. Бұл микроскоп 100-ден 1000 есеге дейін ұлғайған кезде металдар мен қорытпалардың фазалық құрамы мен құрылымдық ерекшеліктерін зерттеуге арналған.

JEOL JXA-8230 микроскобында (7 Сурет) 4 кристалды толқындық спектрометрдің көмегімен титанның қатты ерітіндісінің бастапқы кристалдарының құрамына және 5 мкм-ден кем емес бөлшектердегі басқа фазаларға микрорентгеноспекторлық талдау жүргізілді.



7 Сурет - JEOL JXA-8230 электрондық растрлық сканерлеу микроскобы

Сонымен қатар, зерттеудің химиялық, механикалық және құрылымдық әдістерін толықтыру үшін зерттелетін үлгілердің сапалық және сандық фазалық құрамы «BrukerD8 Advance» рентген дифрактометрінде рентгендік дифракциялық талдауды қолдану арқылы анықталды. Құрылғы жоғары өнімділікке және деректерді өңдеу дәлдігіне ие. Құрылғының компьютерінде DIFFRAC plus SEARCH әлемдік файлы орнатылған, оның көмегімен мәліметтер нәтижелері өңделіп, дереу басылып шығарылады.

2.6 Титан қорытпаларынан жасалған үлгілердің механикалық қасиеттерін анықтау әдістемесі

Жеке құйылған үлгілердің механикалық қасиеттері (уақытша кедергі – σ_y , аққыштық шегі – $\sigma_{0,2}$ және салыстырмалы ұзару – δ) Р-10 типті үзу машинасында бір осьті созылуға сынау нәтижелері бойынша анықталды. Сынақтар ГОСТ 1497-84 бойынша жүргізілді. Сынақ жылдамдығы 5 мм/мин тең.

Үлгілердің қысымға қарсыласу қабілетін анықтау

Жоғары температурада біз Hydrawedge II модулі орнатылған Gleeble 3800 термомеханикалық процестерін физикалық модельдеу кешенінде жүргіздік. Сынақ үлгілері ретінде диаметрі 6 мм және биіктігі 10 мм цилиндрлер қолданылды. Үлгілерді қыздыру электр тогын тікелей өткізу арқылы жүзеге асырылды. Температураны бақылау үшін термопаралар (S типті) тікелей үлгі бетіне дәнекерленді. Сынақтар 10^{-4} мм сын.бағ.вакуумда жүргізілді. Үлгілер мөлшерінің өзгерістерін дәл тіркеу үшін сынақтың осы түріне арнайы бейімделген және қолданылатын үлгілер өлшемі траверзаның қозғалысын емес, жүргізілетін сынақтар барысында цилиндрлік үлгілердің биіктігі мен диаметрінің тікелей өзгеруін тіркейтін аспалы датчиктер (экстензометрлер) пайдаланылды.

Сынақ нәтижелері бойынша 20-1000°C температура арасында Юнг модулінің, аққыштық шегінің және пропорционалдық шектің тәуелділігі анықталды.

Үлгілердің созылуға қабілетін анықтау

Созылу сынақтарын жүргізу үшін әр қорытпадан ГОСТ 1583-93 сәйкес металл құймақалыпқа шыбықтар құйылды. Барлық үлгілер үшін созылу сынақтары Р-10 типті үзу машинасында жүргізілді. Үлгілердің механикалық қасиеттері уақытша кедергі (σ_y), шартты аққыштық шегі ($\sigma_{0,2}$) және салыстырмалы ұзару (δ) мәндерімен бағаланды.

Үлгілердің қаттылығын анықтау

Бұл жұмыста ГОСТ 6012-59 сәйкес Бринелл бойынша стандартты қаттылықты өлшеу жүргізілді. Қаттылықты өлшеу үшін диаметрі 2,5 мм болат шар инденторы бар, көп функциялы стационарлық HBV-30A қаттылықты өлшейтін құрылғы (9 Сурет) қолданылды. Индикаторға 62,5 кг жүктеме берілді. Әр сынақтың уақыты 15 секунд болды. Әр үлгі үшін үш өлшемнен тұратын серия жасалды.



9 Сурет – Қаттылықты өлшейтін HBV-30A құрылғысы

Қатты өлшейтін құрылғы Бринелл мен Виккерс бойыншы қара және түсті металдардың қаттылығын өлшеуге арналған, сонымен қатар, массивті және үлкен, жұқа және кішкентай үлгілердің қаттылығын өлшеуге бейімделген.

Кристалдардың микроқаттылығын анықтау

Титан қорытпаларының құрылымдық компоненттерінің микроқаттылығы 10г жүктеме кезінде ПМТ-3М құрылғысында (10 сурет) анықталды. Шлифтер электролиттік жылтырату арқылы микроқаттылықты анықтау үшін және сканерлеуші электронды микроскоп арқылы құрылымды егжей-тегжейлі талдау үшін дайындалды. Қорытпалардың ликвидус пен солидус температураларын анықтау үшін дифференциалды термиялық талдау жүргізілді. Бұл зерттеулердің мақсаты күй-жай диаграммаларының фрагменттерін құру және нәтижелерді есептелген деректермен салыстыру үшін қорытпалардағы фазалық өзгерістердің критикалық температурасын анықтау болды.



10 Сурет – Микроқаттылықты өлшейтін ПМТ-3М құрылғысы

2.7 Көп компонентті системалардың фазалық диаграммаларын компьютерлік есептеу әдістемесі

Диссертациялық жұмыста эксперименттік әдістерді қолдану арқылы, сондай-ақ заманауи Thermo-Calc бағдарламасының көмегімен [45] титан негізіндегі көп компонентті системалардың күй диаграммаларының политермиялық және изотермиялық қималары, ликвидус және солидус беттерінің проекциялары. Сонымен бірге титан қорытпаларының тепе-тең емес күйде кристалдану процестері есептелді. Бұл бағдарлама титан негізіндегі қорытпалардың кезкелген температурадағы фазалық құрамын сандық деңгейде есептеуге мүмкіндік береді. Мұндай ғылыми ақпаратты толығымен алу үшін компьютерлік есептеу программаларын игеру және оларды іс жүзінде қолдану аса маңызды жетістік болып табылады. Одан басқа, екі, үш және әсіресе көп компонентті системалардың фазалық диаграммалары мен қорытпалардың термодинамикалық қасиеттерін тәжірибелік зерттеу көп уақыт пен үлкен қаржылық ресурстарды қажет етеді.

Жалпы теориялық есептеулер: 1) фазалық тепе-теңдік және термодинамикалық қасиеттер бойынша эксперименттік ақпаратты үйлестіруді жүзеге асыруға; 2) үш немесе одан да көп компоненттік системалардың жаңа фазалық диаграммаларын тұрғызу үшін эксперименттік зерттеулерге қажетті шығын көлемі мен уақытты айтарлықтай қысқартуға; 3) тәжірибелік деректер жоқаймақтарда, қорытпалардың химиялық құрамы мен

температурасына байланысты термодинамикалық қасиеттерін болжауға мүмкіндік береді.

Бүгінгі таңда материалтану саласындағы мәселелерді шешуге және жаңа перспективті қорытпаларды алуға дайын бірқатар бағдарламалар ұсынылып отыр. Көп жағдайда бұл бағдарламалардың мақсаты сандық модельдеу болып табылады. Қазіргі уақытта материалдарды зерттеу мен оларды әзірлеуді тиімдірек етуге мүмкіндік беретін бірқатар бағдарламалар бар. Олардың ішінде Thermo-Calc AB (Швеция) компаниясының бағдарламалық өнімдерін бөліп көрсетуге болады. Бұл бағдарламаның негізгі мақсаты материалдардың термодинамикалық қасиеттерін сандық модельдеу және есептеу болып табылады [46]. Thermo-Calc бағдарламалсын қолдану көп компонентті жүйелердің әрекетін термодинамикалық болжау нәтижесінде эксперименттік жұмысты оңтайландыру арқылы уақыт пен материалдық шығындарды едәуір азайтуға мүмкіндік береді.

Thermo-Calc бағдарламасы

Thermo-Calc бағдарламалар пакеті 1997 жылы Корольдік технологиялық институтының (Стокгольм, Швеция) материалтану және инженерлік ғылымдар кафедрасы негізінде құрылған Thermo-Calc Software (TCS) компаниясының өнімі болып табылады. Thermo-Calc Software компаниясы материалдарды әзірлеу және зерттеу саласындағы сандық модельдеу сегментіндегі ең тәжірибелі бағдарламалық жасақтама жеткізушілерінің бірі.

Thermo-Calc бағдарламалық жасақтамасы бүкіл әлемде кең таралған және термодинамикалық модельдеу үшін ең көп қолданылатын бағдарламалық жасақтама болып табылады. Thermo-Calc бағдарламасының артықшылығы термодинамикалық мәліметтер базасын қолдана отырып, тепе-теңдік күй мен термодинамикалық шамалардың стандартты есебін ғана емес, сонымен қатар есептеудің арнайы түрлерін де қамтамасыз ету мүмкіндігін беруінде: мысалы, DICTRA модулі көп компонентті қорытпалардағы диффузияны дәл модельдеуге мүмкіндік береді [47]

TCS компаниясымен жасаған бағдарламалардың құрамына келесі өнімдер кіреді:

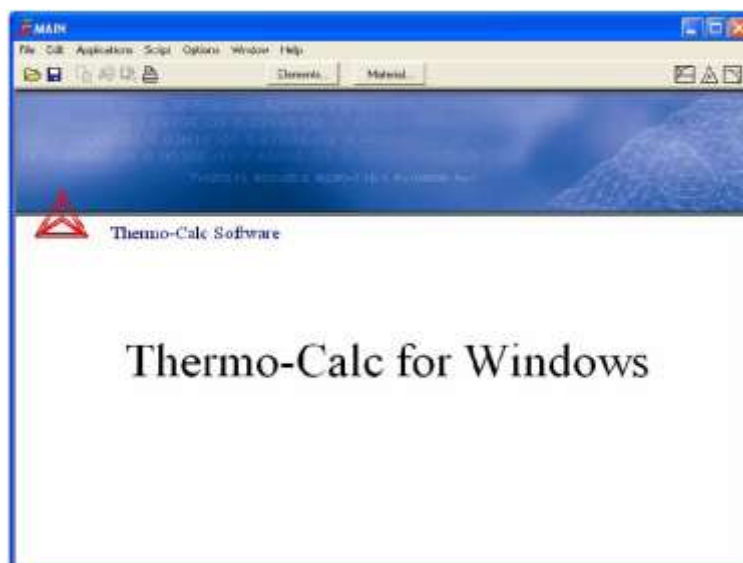
Thermo-Calc Classic-TCC. Тепе-теңдік күйді, термодинамикалық қасиеттерді және фазалық диаграммаларды зерттеудің қуатты құралдарына ие Thermo-Calc бағдарламасының классикалық нұсқасы

TCInterfaces.Интерфейсті дамыту құралы. Бұл модуль өз бағдарламаларым ызды әзірлеу кезінде Thermo-Calc қолдануға мүмкіндік береді

DICTRA- Diffusion Simulation Software. Көп компонентті қорытпалардағы диффузия процесін модельдеуге арналған әмбебап құрал.

Databases- Thermodynamics and Diffusion. Thermo-Calc Software Thermo-Calc және DICTRA үйлесе отырып, термодинамика және диффузия туралы мәліметтер базасының кең таңдауын ұсынады.

Thermo-Calc for Windows.TCW4 - Windows амалдық жүйесіне арналған Thermo-Calc бағдарламасының бейімделген нұсқасы (11 Сурет). Модельдеу процессін зерттеушілерге максималды дәрежеде ыңғайлы етеді, ал күрделі есептеулерді жүргізу оңтайлы жолдармен жүргізіледі.



11 Сурет - Windows нұсқасы үшін Thermo-Calc жұмыс терезесі

Thermo-Calc бағдарламасы тепе-теңдік жүйелерімен, яғни ішкі ауытқуларға және температура мен құрам сияқты бірқатар параметрлерге қатысты тұрақты күйде болатын классикалық термодинамиканың моделіне негізделген. Тепе-теңдік күйіндегі қасиеттерді анықтайтын бұл параметрлер күй айнымалысы деп аталады. Күй айнымалыларының басқа мысалдары-қысым және химиялық потенциал. Термодинамика тепе-теңдік күйіндегі кез-келген термодинамикалық параметрлерді есептеуге мүмкіндік беретін күй айнымалылары арасындағы сандық қатынасты қарастырады .[47]

Термодинамикалық есептеулерге арналған кез-келген бағдарламалық жасақтама дәл және сенімді деректерді қолданбаса, есептеу нәтижелері іске жарамсыз. Thermo-Calc бағдарламасы түрлі беделді дереккөздерден құралған, мұқият тексерілген, жоғары сапалы мәліметтер базасын (SGTE, CAMPADA, CCT, ThermoTech, NPL, NIST, MIT, Theoretical Geochemistry Group және т.б) пайдалануға мүмкіндік береді. Мұндай мәліметтер базасы гетерогенді жүйенің бөлігі ретінде әр фаза үшін әртүрлі термодинамикалық модельдерді қолданады [98]. Қазіргі уақытта қолданыста жүрген Thermo-Calc мәліметтер базасында болаттар, қорытпалар, керамика, балқымалар, әйнектер және басқа да көптеген жүйелер туралы ақпарат бар.

Thermo-Calc бағдарламасы идеалды емес фазалары бар жүйелер үшін арнайы жасалған. Авторлар бұл көп компонентті жүйелердегі бес тәуелсіз айнымалысы бар фазалық диаграммалардың еркін бөлімдерін есептей алатын жалғыз бағдарламалық жасақтама деп санайды [48]. Бұл бағдарламаның жұмысы Гиббс энергиясының ғаламдық минимизациясының әмбебап

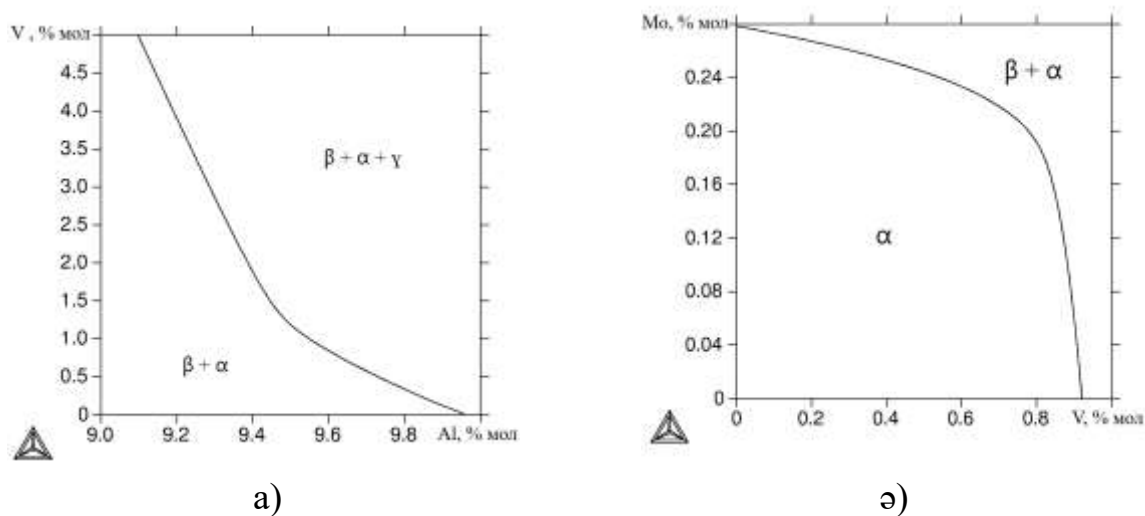
алгоритміне негізделген, көп компонентті жүйелерді максималды компоненттер санымен (40) жуық мәндерді көрсетпей есептеуге жарамды. Осы бағдарламаның көмегімен фазалық диаграммаларды құрумен қатар, фазалардың термодинамикалық қасиеттерін (Гиббс энергиясы, энтальпия, жылу сыйымдылығы және т.б.), метастабильді тепе-теңдікті және тағыда сол сияқты мәндерді есептеуге болады. Бағдарламада сонымен қатар диаграмманың басқа түрлерін есептеу құралдарыда бар, мысалы, CVD (CVD depositions) ығысуы, Scheil–Gulliver бойынша қатаюды модельдеу, газдардағы ішінара қысым және т. б. Thermo-Calc көмегімен жүйеде әр фаза үшін әртүрлі модельдерді қолданатын көптеген көздерден мәліметтер базасын пайдалануға болады [49].

3 Ғылыми - зерттеу нәтижелері

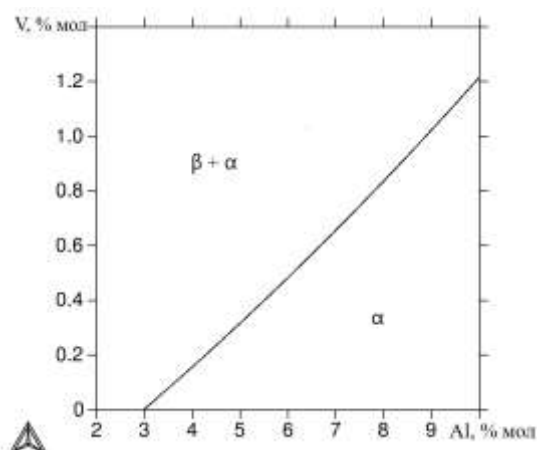
3.1 Ti –Al – V – Mo системасының фазалық диаграммасының изотермиялық қималары

Перспективалы қорытпаларды жасау және оларды құю мен термиялық өңдеудің озық технологияларын жасау тиісті жүйелердің фазалық диаграммалары негізінде жүзеге асырылады. Алайда титанға негізделген көп компонентті системалардың фазалық диаграммалары іс жүзінде зерттелмеген. Оларды эксперименттік зерттеу ұзақ уақытты және айтарлықтай материалдық шығындарды талап етеді. Осыған байланысты, осы жұмыста есептеу арқылы бірқатар титан қорытпалары үшін фазалық түрлендірулер алынды. Бұл үшін Thermo-Calc [45,50] мамандандырылған компьютерлік бағдарламасы қолданылды.

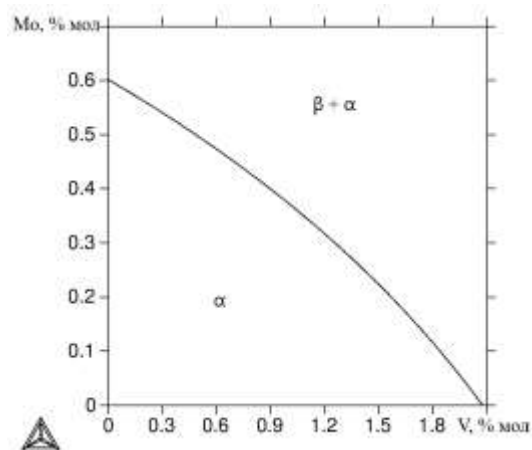
12 және 13 - суреттерде Ti-Al-V-Mo системасы фазалық диаграммасының 400°C және 700°C температуралардағы есептеліп тұрғызылған изотермиялық қималары көрсетілген. Есептеу нәтижесінде аталған температуралық және концентрациялық аймақтарда титан негізіндегі қорытпаларда мына төмендегідей фазалардың пайда болатыны анықталды: α - α -титан негізіндегі қатты ерітінді; β - β -титан негізіндегі қатты ерітінді; β_2 - аралық қатты ерітінді; γ – TiAl алюминиді негізіндегі қатты ерітінді.



12 Сурет - Ti-Al-V-Mo системасының изотермиялық қималары (а – 0,5 % Мо; ә – 6 % Al);. 400°C.



а)



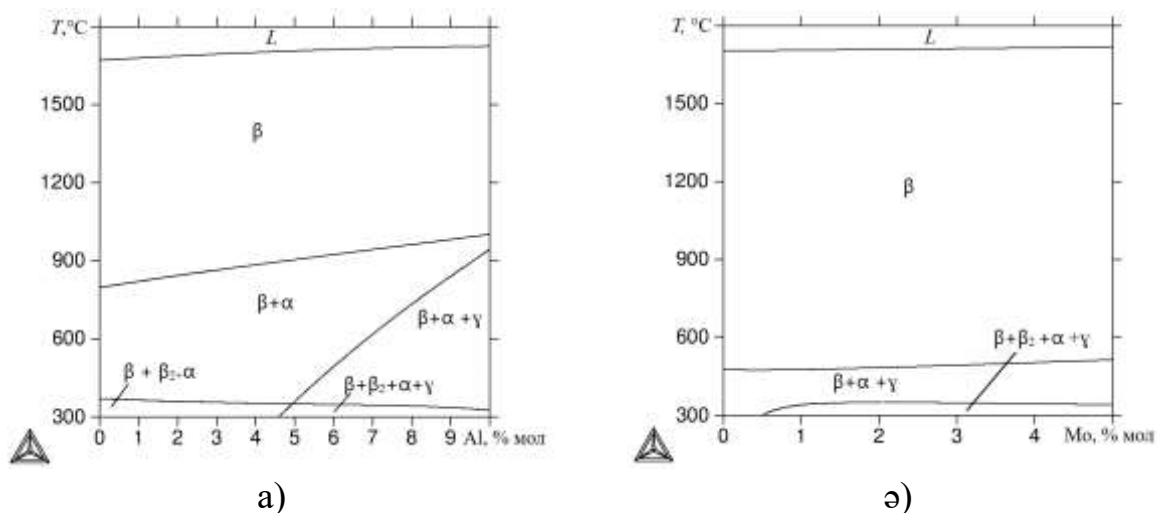
ә)

13 Сурет - Ti-Al-V-Mo системасының изотермиялық қималары (а – 0,5 % Mo; ә – 6 % Al); 700°C.

Екі элементтің бірлескен әсерін талдауға мүмкіндік беретін изотермиялық қималар өндірістік белгілі ВТ6 қорытпасының фазалық құрамының айтарлықтай өзгеруі мүмкін екенін көрсетеді. Атап айтқанда, 400°C кезінде (12 Сурет) α және β фазаларынан басқа, осы қорытпаның қасиеттеріне айтарлықтай әсерін тигізетін интерметаллидтік фаза γ (TiAl) түзілуі мүмкін. Ұсақ түйіршікті интерметаллид TiAl қорытпаның шектен тыс жоғары пластикалық қасиетін қамтамасыз ете алады. [51]

3.1.1 Ti – Al – V – Mo системасының фазалық диаграммасының политермиялық қималары.

Политермиялық қималардың көмегімен қорытпаларды суыту және қыздыру кезінде олардың фазалық құрамның қалыптасуына легірлеуші элементтердің әсерін зерттеуге болады. Атап айтқанда, қыздыру кезінде легірлеуші элементтердің $T_{\text{пө}}$ полиморфтік өзгеріс температурасына (β -аймағына өту температурасына) қаншалықты әсер ететінін анықтауға мүмкіндік береді [52]. Мысалы, 14-суреттен ВТ6 қорытпасының құрамындағы алюминий $T_{\text{пө}}$ мәнін едәуір арттыратыны (14 а Сурет), ал молибден, керісінше, бұл температураны төмендететінін көруге болады (14 ә Сурет).



14 Сурет - Ti-Al-V-Mo системасы фазалық диаграммасының политермиялық қималары.
(а – 3 % V, 3 % Mo; ә – 6 % Al, 3 % V;).

3.1.2 Ti – Al – V – Mo системасы қорытпасының фазалық құрамы мен құрылысы

Төрт компонентті гамма қорытпаларының фазалық құрамы үш компонентті қорытпаларға карағанда күрделі болып келеді. Оны эксперименттік мәліметтерден де, есептеу нәтижелерінен де туындайтын фазалық құрамның сандық параметрлеріндегі айырмашылықтардан байқай аламыз.

Тепе-теңдік күйде кристалдану кезіндегі Ti-Al-V-Mo системасы қорытпасына тән температура 9-кестеде келтірілген. 9-кестеде көртелілгендей, жылдам суыту кезінде қорытпалардың кристалдану интервалы қорытпалардың құрамына байланысты болады. Мысалы, Ti-Al-V-Mo системасы қорытпасының кристалдану интервалы Cr элементінің аз мөлшерімен легірлегенде, 7-18°C-тан 45-149 °C -қа дейін артады.

9 Кесте – Тепе-теңдік күйде кристалдану кезіндегі Ti-Al-V-Mo системасы қорытпасына тән параметрлер

Құрамы, %(масс.)				$T_L, ^\circ\text{C} *$	$T_S, ^\circ\text{C} *$	$\Delta T, ^\circ\text{C} *$	$T_{NS}, ^\circ\text{C} *$	$\Delta T_{NS}, ^\circ\text{C} *$
Al	Mo	V	Cr					
6	3	3	-	1710	1703	7	1664,57	45,43
6	3	3	3	1679	1661	18	1530	149

* T_L - тепе-теңдік ликвидус температурасы; T_S - тепе-теңдік солидус температурасы; T_{NS} - тепе-тең емес ликвидус температурасы; ΔT және ΔT_{NS} -тепе-тең және тепе-тең емес кристалдану интервалдары.

Ti-Al-V-Mo системасы қорытпасының әртүрлі температурадағы фазалық құрамының сандық параметрлері 10-кестеде көрсетілген.

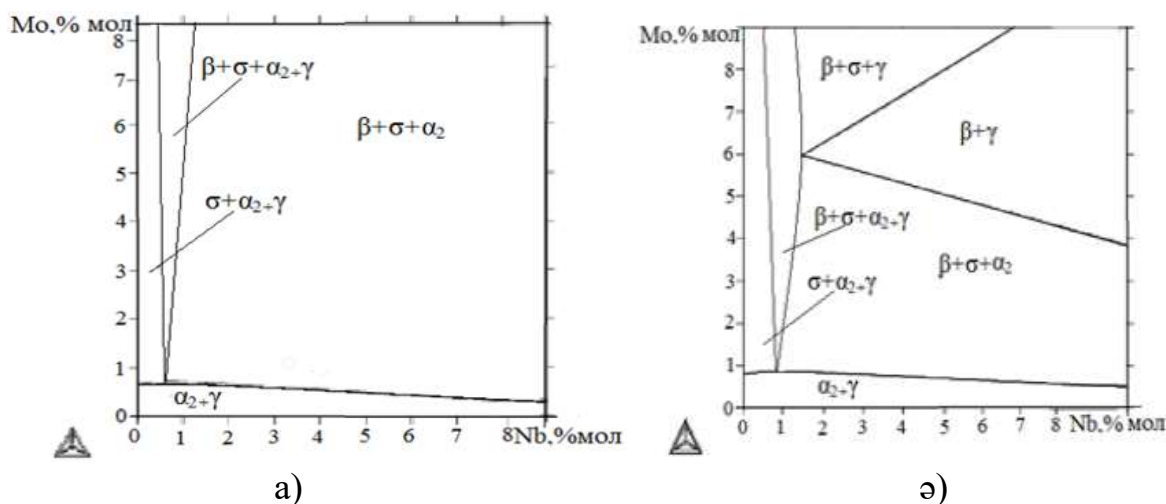
10 Кесте - Ti-Al-V-Mo системасы қорытпасының фазалық құрамының сандық параметрлері

T, °C	Фаза	Q _м , % (масс.)	Химиялық құрамы, % (масс.)			
			Ti	Al	V	Mo
1400	β	100	82,40	2,73	5,17	9,71
1200	β	100	82,40	2,73	5,17	9,71
800	β	100	82,40	2,73	5,17	9,71
600	β	48,15	69,25	1,99	9,39	19,37
	α	51,85	94,61	3,42	1,23	0,75
400	β	26,25	45,65	1,12	17,42	35,81
	α	73,74	95,48	3,31	0,80	0,42

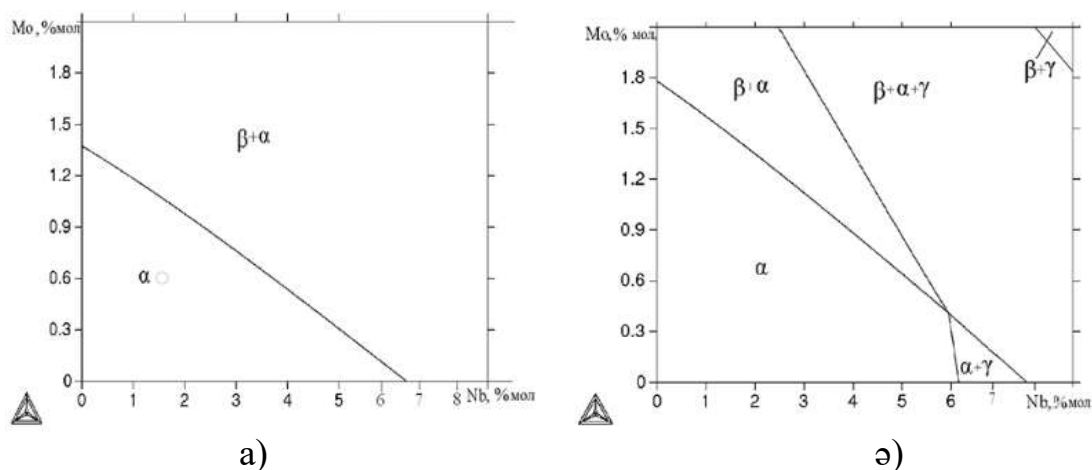
Псевдо α-титан негізіндегі құйма қорытпалардың фазалық құрамы туралы алынған нәтижелер жаңа, перспективалы титан қорытпаларының химиялық құрамын, оларды термиялық өңдеу режимдерін таңдауды ғылыми негіздеуге мүмкіндік берді. Болашақта тәжірибелік қорытпаларды жасау және олардың фазалық құрамын, құрылымы мен қасиеттерін тәжірибелік зерттеу жоспарлануда.

3.2 Ti –Al– Nb – Mo системасының фазалық диаграммасының изотермиялық қимасы

15 және 16-суреттерде Ti-Al-Nb-Mo системасының 1100 және 1250°C температураларда есептеліп тұрғызылған изотермиялық қималары көрсетілген.



15 Сурет - Ti –Al – Nb– Mo системасы диаграммасының 1100 ° C температуралардағы изотермиялық қималары (а –40% Al ; ә –43% Al).



16 Сурет - Ti –Al – Nb– Mo системасы диаграммасының 1250 °C температурадағы изотермиялық қималары (а –40% Al ; ә –43% Al)

1100°C температурада (яғни эвтектоидтық өзгеріс температурасынан жоғары), компоненттердің сандық қатынасына байланысты α , γ , β және σ фазаларының қатысуымен екі, үш және төрт фазалық аймақтар құрылады (15 а Сурет). Осы температурада қарастырылып отырған қорытпалар үш фазалы аймақта орналасқан, алайда. Ниобийдің концентрациясы аздап төмендеген кезде, β фазаның шамасы азайып, жоқ болады. Сонымен қатар, молибден мен ниобийдің концентрацияларының артуы құрамында 43% алюминий бар қорытпаларда (15 ә Сурет) α -фазаның жоғалуына алып келеді. α - фазаның әсері тиімсіз болғандықтан, бұл қималар берілген температурада жұмыс істеуге арналған γ - қорытпаның құрамын дұрыс таңдау қажеттілігін көрсетеді.

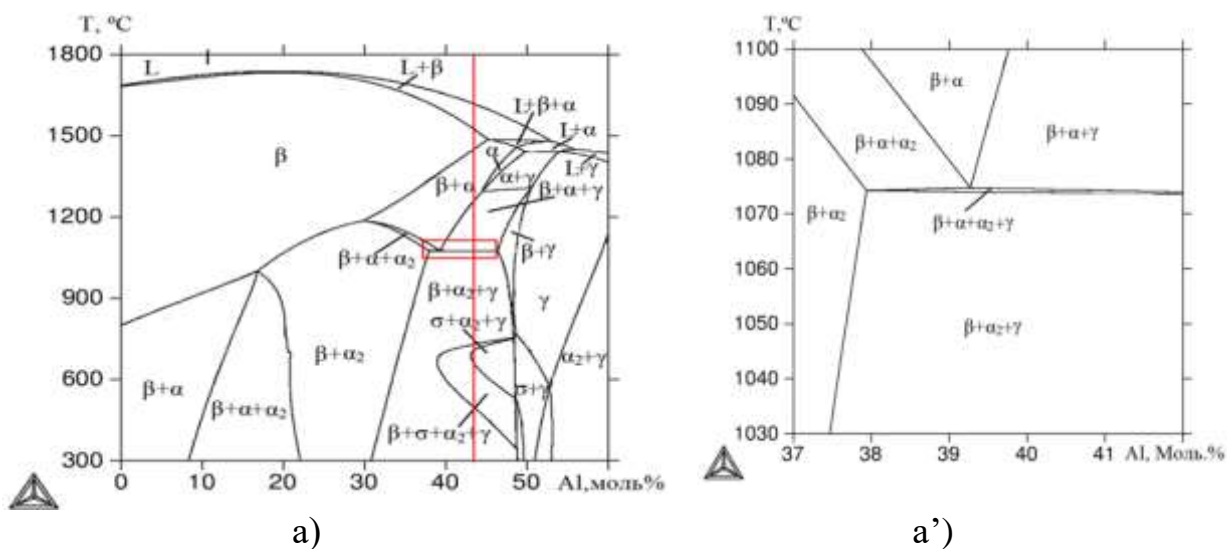
Құрамында 40% алюминий бар қорытпалардың (16 а Сурет) ниобий концентрациясына тәуелділігі айтарлықтай аз. Бұл қорытпаларда β -фаза молибден мен ниобийдің қосынды шамалары жоғары болған кезінде ғана пайда болады. 16 ә - суретте құрамында 43%Al, 1%Mo және 4%Nb бар қорытпалар 1250 °C температурада екі фазалы ($\beta + \alpha$) аймаққа түсетіндігі көрсетілген. Ниобий концентрациясының шамалы өзгерісі бір фазалы (α) және үш фазалы ($\beta + \alpha + \gamma$) аймақтарға ауысуына әкелетіні байқалады.

3.2.1. Ti –Al– Nb – Mo системасының фазалық диаграммасының политермиялық қимасы

Төрт компонентті системалардың политермиялық қималары үш компонентті системалардың политермиялық қималарынан сапалық жағынан айырмашылығы аз. Екі жағдайда да олар фазалық аймақтардың шекараларын координаталық концентрацияда (компоненттердің бірінде) - температурада көрсетеді. Олар осы қима қорытпалары үшін фазалық өзгерістердің температурасын анықтауға мүмкіндік береді. Сонымен қатар, олар фазалық аймақтардың үлкен санын қамтиды және олардың көпшілігін анықтау

кеңейтілген масштабты қажет етеді. Сондықтан төрт компонентті системаның бір политемиялық қимасын талдау үшін көбінесе бірнеше графикалық суреттер қолданылады.

Nb мен Mo тұрақты концентрацияларында (сәйкесінше 4,4 және 1,1%) және алюминийдің гамма қорытпаларына қолданылатын айнымалы концентрациясында есептелген политемиялық қима 17- суретте көрсетілген. Гамма қорытпаларының тепе-теңдік күйде кристалдануы тек екі температурамен сипатталады: ликвидус (T_L) және солидус (T_S). β –аймағында суытылғаннан кейін полиморфты өзгеріс ($\beta \rightarrow \alpha$), содан кейін қайтадан γ -кристалдардың бөлінуі және эвтектоидтық $\alpha \rightarrow (\alpha_2 + \gamma)$ орын алады. Ол көбінесе қорытпалардың соңғы құрылысын анықтайды. Айта кету керек, бұл төрт компонентті системада төрт фазалы ($\beta + \gamma + \alpha + \alpha_2$) өзгеріс орын алады.



17 Сурет - Ti - Al – Nb- Mo системасы диаграммасының политемиялық қимасы (4,4 % Nb , 1,1 % Mo).

Термодинамикалық есептеу әдісі зерттелген қорытпаларда әртүрлі фазалар пайда болатындығын жақсы көрсетті. Құрамында 43% Al бар қорытпасында сұйық фазадан алдымен β фаза кристалданады, бұл 17-суреттен айқын көрінеді. Температура төмендеген кезде бір фазалы β -аймақтан қорытпа екі фазалы $\beta + \alpha$ аймағы арқылы үш фазалы $\beta + \alpha + \gamma$ аймаққа өтеді. Төрт фазалы аймақты зерттеу өту үшін құрамында 40% Al бар Ti-Al-Nb-Mo системасының политемиялық қимасы қарастырылды. Эвтектоидтық төрт фазалы реакция ($\beta + \alpha + \alpha_2 + \gamma$) құрамында 38-тен 46% дейін алюминий болатын қорытпаларда жүреді (17, а' сурет). Одан кейінгі суыту кезінде орын алатын өзгерістерді есептеу σ фазаның пайда болуы мен қайтадан жоғалу температураларын, сондай-ақ β фазаның толығымен жоқ болуының температуралық шекараларын көрсетеді. Бұл өзгерістер қорытпалардан жасалатын бұйымдардың жұмыс температуралар диапазонына сәйкес келеді.

Бұл жалпы жағдайда аса тиімді емес, өйткені бұл қорытпалардың құрылысының тұрақсыздығын білдіреді. Сондықтан таңдалып алынған қорытпалардағы алюминий концентрациясы ~43 % -тен аспауы керек.

Thermo-Calc бағдарламасы салыстырмалы түрде қысқа мерзімде осындай кималардың көп мөлшерін есептеуге мүмкіндік береді.

3.2.2 Ti –Al– Nb – Mo системасы қорытпасының фазалық құрамы мен құрылысы

Құрамында 1 және 2 мол.% Mo бар төрт компонентті системаның қорытпаларында орын алатын фазалық өзгерістер есептелді. Есептеу нәтижелері 11 және 12-кестелерде көрсетілген. 11-кестеден 1400⁰С температурада Ti - 43% Al - 4% Nb - 1% Mo қорытпасы екі фазалы ($\alpha + \beta$) екендігін, және де β фазасының салыстырмалы шамасы 31,34% - үштен бір бөлін құрайды. Осы фазадағы Mo және Nb концентрациясы α фазасына карағанда біршама жоғары. 1200⁰С-та бұл фазаларға γ -фазасы (Mo шамасы аз) қосылады. 1000⁰С және одан төмен температураларда қорытпадағы фазалар саны үшке (α_2 , β және γ) жетеді, ал γ фазаның мөлшері 75% жуықтайды.

11 Кесте –Ti-43Al-4Nb-1Mo системасы қорытпасының фазалық құрамының әртүрлі температурадағы сандық параметрлері

T, °C	Фаза	Q _M , масс. %	Элементтер құрамы, % (масс.)			
			Ti	Al	Nb	Mo
1400	α	68,66	57,72	30,34	10,36	1,58
	β	31,34	55,21	27,55	13,26	3,98
1200	α	33,56	61,20	27,36	9,71	1,73
	β	18,95	54,54	24,70	15,09	5,67
	γ	47,49	54,87	32,86	10,85	1,42
1000	β	10,63	51,19	22,04	16,61	10,16
	α_2	16,38	67,21	23,77	8,25	0,77
	γ	72,99	55,47	31,82	11,17	1,54
800	β	2,67	37,94	18,30	20,78	22,98
	α_2	22,63	68,57	22,46	7,98	0,99
	γ	74,70	54,09	31,99	11,93	1,99
600	β	3,35	4,52	7,40	42,68	45,40
	α_2	21,85	71,51	21,61	6,39	0,49
	γ	74,80	55,03	32,75	11,29	0,93

Ti–41% Al–4% Nb –1% Mo қорытпасы алдыңғы қорытпадан, негізінен β фазасының көптігімен және 600⁰С σ фазаның пайда болуымен ерекшеленеді (12 Кесте). Дәл осы фазаларда молибденнің концентрациясы ең жоғары (шамамен 50 масса.%). Айта кету керек, есептеу σ фазасында ниобийдің жоқтығын көрсетті.

12 Кесте -Ti-41Al-4Nb-1Mo системасы қорытпасының фазалық құрамының әртүрлі температурадағы сандық параметрлері

T, °C	Фаза	Q _M , масс. %	Элементтер құрамы, % (масс.)			
			Ti	Al	Nb	Mo
1400	α	31,43	57,13	31,19	9,40	2,28
	β	68,56	54,21	28,18	11,94	5,67
1200	β	48,73	54,73	24,80	13,03	7,44
	γ	51,27	55,51	33,24	9,35	1,90
1000	β	30,03	52,00	22,16	14,52	11,32
	α ₂	0,11	67,98	24,02	7,14	0,85
	γ	69,86	56,45	32,13	9,70	1,72
800	β	12,25	39,06	18,52	18,62	23,80
	α ₂	15,04	69,19	22,65	7,12	1,04
	γ	72,71	54,93	32,25	10,72	2,10
600	β	5,76	4,69	7,37	41,13	46,81
	α ₂	18,06	71,92	21,73	5,83	0,52
	γ	74,15	55,64	32,95	10,41	1,00
	σ	2,03	30,06	17,10	< 0,01	52,84

Құрамында ниобий бар төрт компонентті гамма қорытпаларының фазалық өзгеріс температураларын есептеу нәтижелері 13-кестеде көрсетілген. Олар төртінші элементтің алюминийдің (41 және 43%) және ниобийдің (4%) тұрақты концентрациясындағы ликвидус пен солидус температураларына әсерін талдауға мүмкіндік береді. Негізгі үш компонентті қорытпалар үшін кристалдану параметрлері (Ti - 41% Al - 4% Nb және Ti - 43% Al - 4% Nb) 13- кестеде келтірілген.

13 Кесте -Тепе-теңдік және тепе-теңдік емес кристалдану кезіндегі Ti - Al - Nb - Mo қорытпаларының типтік параметрлері

№	Құрамы, мол. %			T _L , °C	T _S , °C	ΔT, °C	T _{NS} , °C	ΔT _{NS} , °C
	Al	Nb	Mo					
1	41	4	1	1656	1589	67	1331	325
2	41	4	2	1657	1586	71	1321	336
3	41	4	4	1660	1579	81	1319	341
4	43	4	1	1603	1491	112	1392	211
5	43	4	2	1602	1485	117	1389	213
6	43	4	4	1603	1473	130	1387	216

Ti - Al - Nb - Mo системасы үшін құрамында 1, 2 және 4% Mo бар қорытпалар есептелді. 13-кестеде көрсетілгендей, 41% Al кезінде Mo концентрациясының 1-ден 4% -ға дейін жоғарылауы ликвидусті 4°C-қа арттырды, бірақ солидус 10°C-қа азаяды. Бұл ΔT_S мәнін 14°C-қа жоғарлатады. Тепе-тең емес солидус пен ΔT_{NS} мәні шамамен бірдей мөлшерде азайды. Алынған мәліметтерден Ti - Al - Nb - Mo системасы қорытпаларын балқыту үшін 1600-1650°C температураларынан жоғары, ал термиялық өңдеу үшін - 1300-1350°C-тан төмен температураларда жүргізілуі керек екендігі анықталды. Молибден кристалдану диапазонын (ΔT_{NS}) аздап жоғарылататындықтан, бұл элемент құрамында бір ниобий қоспасы бар гамма қорытпаларының құю қасиеттеріне кері әсер етпеуі керек екендігі белгілі болды.

4 Тәжірибелік зерттеулер

4.1 Al-Nb және Al-Mo негізіндегі лигатураларды дайындау әдістемелерін жасау

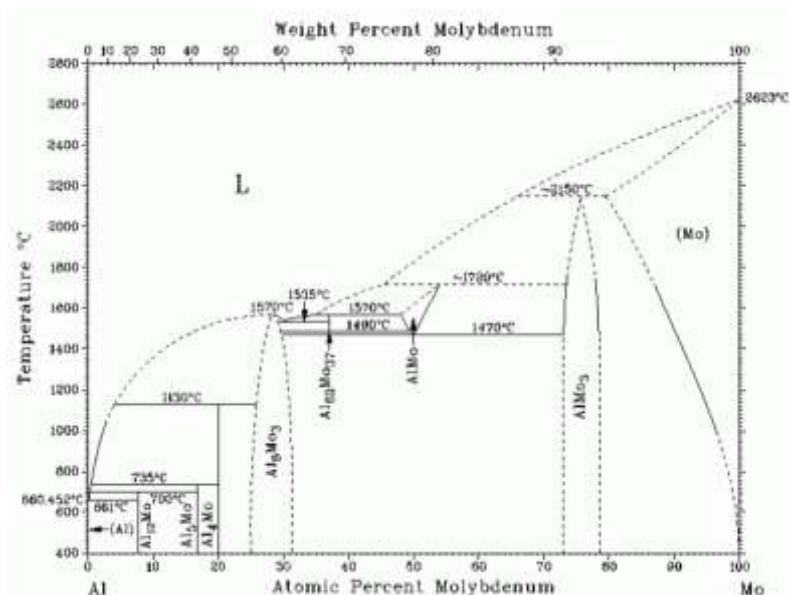
Ti-43Al-4Nb-1Mo системасы негізінде гамма қорытпасын алу үшін қолданылатын Al-57% Mo және Al-45% Nb қорытпаларының оптималды химиялық құрамы Al-Nb және Al-Mo екі компонентті системалардың белгілі фазалық күй-жай диаграммалары негізінде анықталды. (19 және 20 Сурет).

Диссетаациялық жұмыста Al-Nb және Al-Mo негізіндегі лигатураларды алу, оларды гамма қорытпаларын және басқа перспективалы қорытпаларды алуда қолдану үшін арнаулы зерттеулер жүргізілді. Балқыту қондырғысы ретінде «Arc 200» маркалы сумен салқындатылатын мыс тигелді зертханалық вакуумдық электр доғалы пеші қолданылды (18 Сурет).



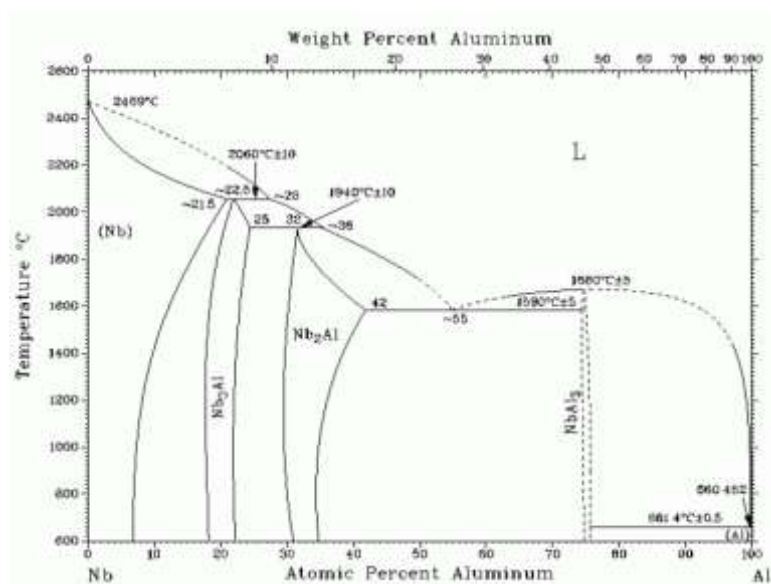
18 Сурет - «Arc 200» маркалы сумен салқындатылатын мыс тигелді зертханалық вакуумдық электр доғалы пеш

Al-Mo системасында (19 Сурет) молибден мөлшері 57% -ке дейінгі қорытпалардың ликвидус температурасы 1600°C-тан төмен. Al_8Mo_3 химиялық қосылысы (57% Mo) 1570°C температурада ериді. Құрамында молибден 57%-тен көп қорытпаларда, балқу температуралары аса жоғары химиялық қосылыстар AlMo (1720 ° C) және $AlMo_3$ (2150 ° C) түзіледі.



19 Сурет - Al-Mo системасының фазалық күй диаграммасы [53]

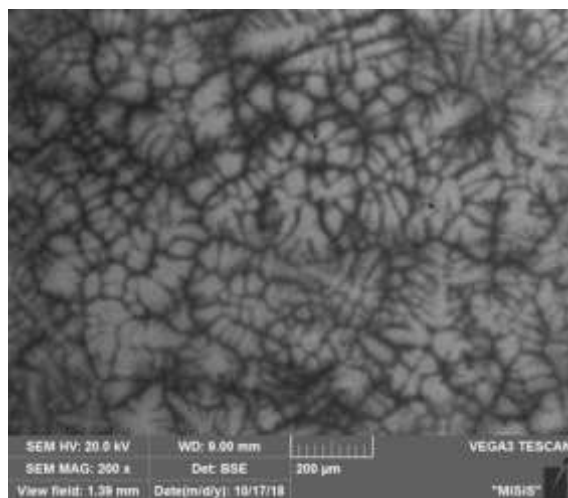
Al-Nb системасының фазалық күй диаграммасында (20 Сурет) көрсетілгендей, құрамында 45%Al бар негізгі қорытпаның балқу температурасы 1680°C - система қорытпаларының ең төменгі кристалдану температурасы болып табылады. Бұл қорытпаның құрылысы негізінен қиын балқитын Al_3Nb фазасының кристалдарынан тұрады. Осыны ескере отырып, гамма қорытпаларын өндіру үшін Nb-55% Al лигатурасы таңдалып алынды.



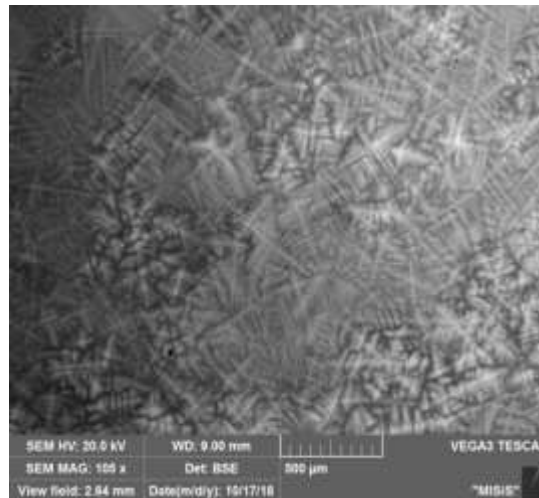
20 Сурет - Al – Nb системасының фазалық күй диаграммасы [53]

Балқыту процесінде лигатуралардың біртекті химиялық құрамын алу үшін пешке жүктелген шихтаның (пештің) шамамен 5-6 айналымы жасалды. Содан кейін, диаметрі 15 мм болатын цилиндрлік құймаларды алу үшін, лигатуралық балқыма металл қалыпқа құйылды.

Al-Nb және Al-Mo лигатуралары үлгілерінің химиялық құрамы мен құрылысы TESCAN VEGA 3 сканерлейтін электронды микроскопында зерттелді.



а) Al – Nb

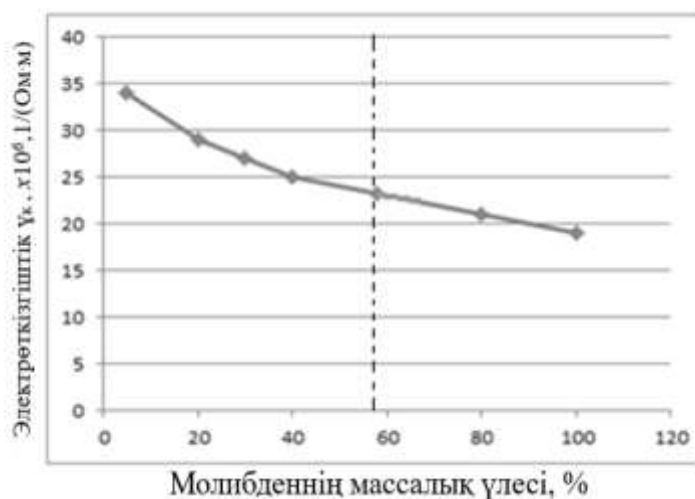


ә) Al – Mo

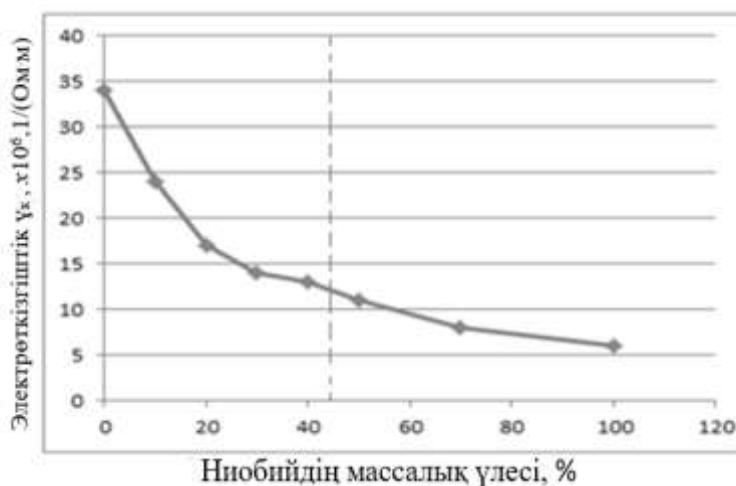
21 Сурет – Лигатуралардың микроқұрылысы

21-суретте сканерлейтін электронды микроскоптағы Al – Nb және Al – Mo лигатураларының микроқұрылысын зерттеу нәтижелері көрсетілген. Al – Nb лигатура үлгісі микроқұрылысындағы фазалар түйіршіктерінің өлшемі 20-40 мкм болады. Бірінші және екінші ретті, жақсы дамыған дендриттік кристалдар бар екендігі анықталды. Al-Mo лигатура үлгілерінің микроқұрылысы - ине немесе пластина тәрізді құрылымдық компоненттің колониялық түрі. Сонымен қатар колониялардың көлеміне енетін өте үлкен ине тәрізді кристалдар пайда болады.

Вакуумдық электр доғалы пеште гамма қорытпаларын дайындау процесіндегі маңызды мәселе - балқыманың электрөткізгіштігі (электр кедергісі) болып табылады. Материалдың электрөткізгіштігі неғұрлым төмен болса, соғұрлым ол тиімді және жылдам қыздырылады және балқытылады. Ал балқу жылдамдығы лигатуралардың жылу өткізгіштігіне байланысты болады. Бұл жұмыста Al-Mo және Al-Nb лигатураларының электр өткізгіштігі (1) формула бойынша аддитивті әдісті қолдану арқылы есептелді. Алынған нәтижелер 22 және 23- суреттерде көрсетілген.



22 Сурет - Молибденнің массалық үлесіне байланысты Al – Mo лигатурасының электр өткізгіштігі



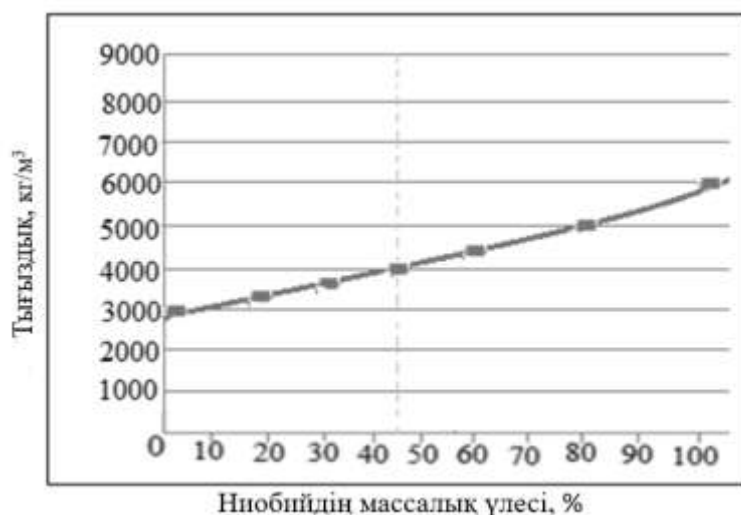
23 Сурет – Ниобийдің массалық үлесіне байланысты Al – Nb лигатурасының электр өткізгіштігі

Ұсынылған мәліметтерден көрініп тұрғандай, молибден мен ниобийдің массалық үлесінің жоғарылауымен негізгі қорытпалардың электр өткізгіштігі төмендейді, ал бұл өз кезегінде вакуумдық доға пешінде гамма қорытпаларының балку ұзақтығының қысқаруына алып келеді.

Лигатуралардың тығыздығы оларды легірлеуші элементтердің ассимиляциялану дәрежесіне тәуелді болатын балқымаға батырудың тереңдігін анықтайды.



24 Сурет - Al – Mo қорытпасының тығыздығына молибденнің массалық үлесінің әсері



25 Сурет - Al – Nb қорытпасының тығыздығына ниобийдің массалық үлесінің әсері

Гамма қорытпаларының орташа тығыздығы 4160кг/м^3 құрайды. Есептеулер көрсеткендей, гамма қорытпаларын өндіруде қолданылатын Al + 57%Mo және Al+45% Nb лигатураларының тығыздығы сәйкесінше 4192кг/м^3 және 4285кг/м^3 құрайды. Берілген мәліметтер гамма қорытпаларын дайындауда легірлеуші элементтердің ену процесіне лигатура тығыздығының қолайлы әсері туралы куәландырады (24 және 25 Сурет).

Қорытпаның балқу температурасы мен тығыздығы титан және гамма қорытпаларының параметрлерімен салыстырылады. Бұл легірлеуші элементтердің тиімді сіңуін және олардың балқыманың көлемінде біркелкі таралуын қамтамасыз етуі керек. Алынған Al-Nb және Al-Mo негізгі қорытпаларының қасиеттерінің үйлесуі гамма қорытпаларының тиімді өндірісін қамтамасыз етеді. Лигатуралардың төмен жылу сыйымдылығы мен жылу өткізгіштігі олардың тезірек еруіне орасан зор септігін тигізеді.

Жоғары электр кедергісі (немесе төмен электрөткізгіштігі) вакуумдық доға пештерінде негізгі қорытпалардың балку процесінің үдеуіне көмектеседі.

Бұл жұмыста лигатуралардың жылу өткізгіштігі аддитивті әдіспен есептелді:

$$\lambda_{\text{л}} = \lambda_{\text{Mo(Nb)}}X_{\text{Mo(Nb)}} + \lambda_{\text{Al}}X_{\text{Al}}, \quad (1)$$

мұндағы, $\lambda_{\text{л}}$ - лигатура жылуөткізгіштігі,Вт/(м·К);

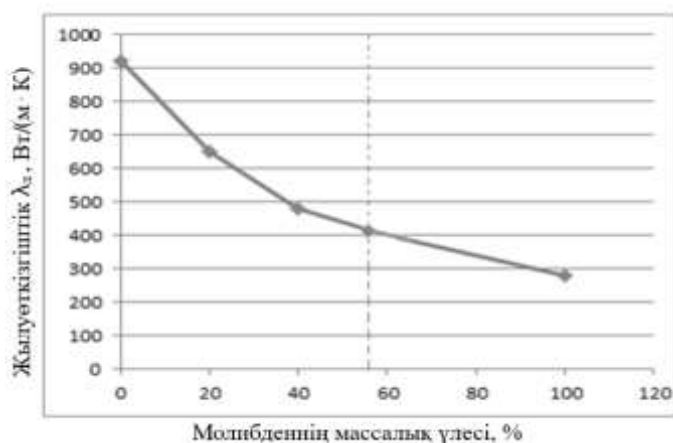
$\lambda_{\text{Mo(Nb)}}$ -молибденнің (ниобий) жылуөткізгіштігі, Вт/(м·К);

λ_{Al} – алюминийдің жылуөткізгіштігі , Вт/(м·К);

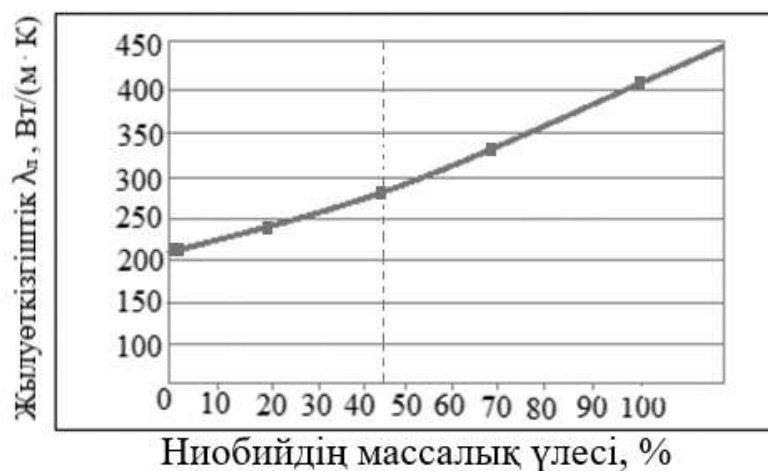
$X_{\text{Mo(Nb)}}$ - молибденнің (ниобий) массалық үлесі, [%];

X_{Al} – алюминийдің массалық үлесі, [%];

Al – Nb және Al – Молигатураларының жылуөткізгіштіктерін есепетеу нәтижелері 26 және 27-суреттерде көрсетілген.



26 Сурет - Al – Моқорытпасының жылу өткізгіштігіне молибденнің массалық үлесінің әсері



27 Сурет - Al–Nb қорытпасының жылөткізгіштігіне ниобийдің массалық үлесінің әсері

Алюминийдің массалық үлесі шамамен 43% болғанда, Al–Mo қорытпасының жылуөткізгіштік коэффициенті 165 Вт/м·К құрайды, бұл алюминий үшін тиісті мәндерден (236 Вт / м · К) едәуір аз. Al – Nb лигатурасы үшін бұл параметрлер 289 Вт / м·К құрайды.

4.2 Ti-Al-Nb-Mo системасы қорытпаларын термиялық өндеудің оптималды режимін табу

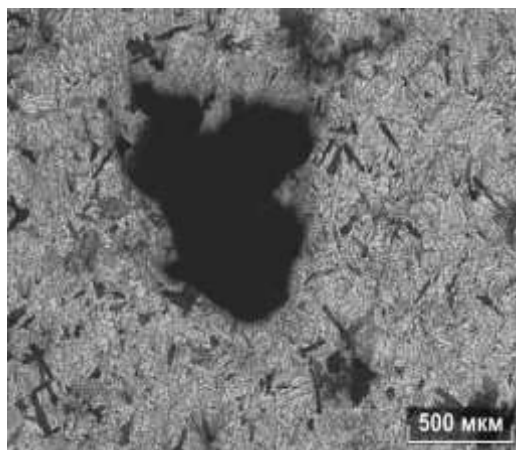
Бұл жұмыста әдеби деректерді талдау және Ti-Al-Nb-Mo системасы қорытпаларының фазалық құрамы, құрылысы мен қасиеттерін сандық талдау негізінде эксперименттік зеттеу үшін 2 термиялық өндеу режимдері таңдалды (14 Кесте).

14 Кесте – Ti-43Al-4Nb-1Mo эксперименттік қорытпасын термиялық өндеу режімдері.

№	Режимдер
1	Газ-статикалық изотермиялық престеу (1250°C, 3 сағат, 170 МПа)+ қыздырып өндеу (800 °C, 3 сағ, ауада)
2	Қыздырып өндеу (1250 °C, 3 сағ, вакуумда)

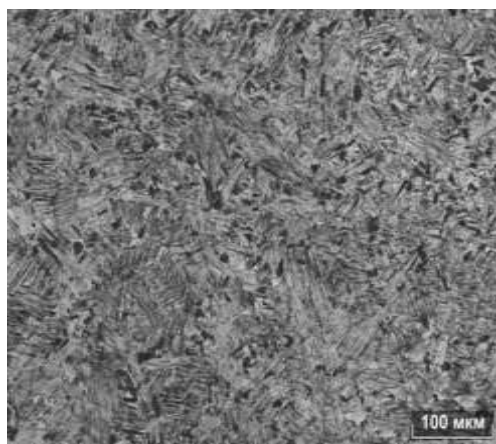
Газ-статикалық изотермиялық престеудің (ГИП) мақсаты: құю кезінде анықталған құйылу кеуектілігін жою немесе азайту және қорытпаның құрылысын жақсарту мақсатында фазалық қайта кристалдандыру. Сондай-ақ β және γ фазаларының берілген мөлшердегі салыстырмалы шамаларын қалыптастыру. ГИП процессінен кейінгі қыздырып өндеудің мақсаты: фазалық аймақтағы үш фазалық ($\alpha_2+\beta+\gamma$) құрылымды тұрақтандыру. Ti-43Al-4Nb-1Mo қорытпасының құйма үлгілерін жоғары температуралы газ-статикалық өндеу HIP 25 / 70-200-2000 құрылғысында жүргізілді.

Құйылған күйде Ti-43Al-4Nb-1Mo қорытпасының негізгі құрылымдық компоненті γ және α_2 фазасының пластиналарынан тұратын колониялар болып табылады (28 Сурет). Бұл колониялар α фазасының эвтектоидты ыдырауы нәтижесінде пайда болады. Осы колониялардың шекаралары бойынша γ және β фазаларының бөлшектері орналасады. Жалпы, құйманың құрылысы біртекті, алайда, құрылымда кеуектер кездеседі. Олардың кейбіреулерінің өлшемдері 0,5 мм-ге жетеді (28 Сурет), бұл жауапты мақсаттағы бөлшектер үшін мүлдем тиімсіз болып табылады.

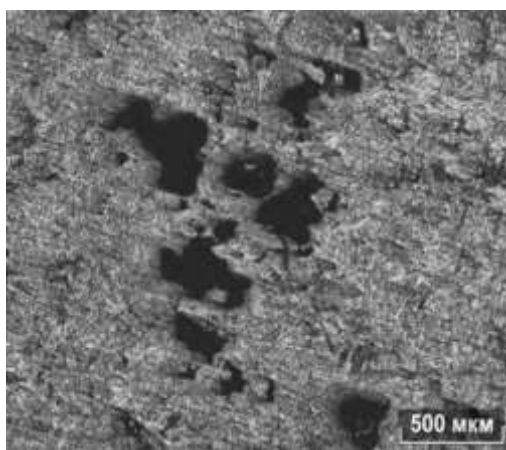


28 Сурет - Ti-43Al-4Nb-1Mo қорытпасының құйма күйіндегі микроқұрылысы, ОМ.

Үлгіні 1 режиммен өңдеу оның микроқұрылысының айтарлықтай жақсаруына алып келді (29 Сурет). Құйма күйіндегі құрылысына қарағанда ол біртекті болады және ұсақтала түседі (дисперстігі артады). Рентгендік сәулемен микроқұрылымдық талдау нәтижелері көрсеткендей, қорытпаның құрылысында кеуектер анықталмады. ГИП-тан кейінгі 800°C температурада қыздырып өңдеу, жарық микроскопында анықталған микроқұрылымда байқалғандай, айтарлықтай өзгерістерге алып келмеді.



29 Сурет - Ti-43Al-4Nb-1Mo қорытпасының ГИП + вакуумды қыздырып өңдеуден (1250 °С, 3 сағ.) кейінгі микроқұрылысы, ОМ.



30 Сурет - Ti-43Al-4Nb-1Mo қорытпасының вакуумды қыздырып өңдеуден (1250 °С, 3 сағ.) кейінгі микроқұрылысы, ОМ.

Жарық микроскопиясы деңгейінде вакуумдық қыздырып өңдеуден кейінгі микроқұрылымның жалпы сипаты ГИП-ден кейінгі микроқұрылыммен салыстырғанда шамамен бірдей. Вакуумдық қыздырып өңдеуден ГИП-ден кемшілігі- кеуектіліктің жойылуына алып келмейді (30 Сурет).

Құймалардың механикалық қасиеттері - аққыштығының шартты шегі ($\sigma_{0,2}$), салыстырмалы қысқаруы (ϵ) және қаттылығы (HV) бөлме температурасында құймалардан кесілген цилиндрлік үлгілердің бір осьті сығылуына жүргізілген сынақтардың нәтижелері бойынша бағаланды. Үлгілерді өлшеу әмбебап Zwick Z250 сынақ машинасында және WilsonWolpert 930N әмбебап қатты өлшеу ішіндегі Виккерс әдісі бойынша жүргізілді.

15 Кесте - Термиялық өңдеу режиміне байланысты үлгілердің қаттылығы (HV)

Өңдеу схемасы	(HV)
Газостатикалық изотермиялық престеу (1250 °С, 3 сағ, 170 МПа)+ қыздырып өңдеу (800 °С, 3 сағ, ауада)	356 ± 10
Қыздырып өңдеу (1250 °С, 3 сағ, вакуумда)	397 ± 15

Үлгінің қаттылығын анықтау (15 Кесте) сынақтың екі режимнен кейінде оның 350 HV-тен жоғары екендігін көрсетті. Бұл қорытпаның беріктік қасиеттерінің жоғары деңгейін көрсетеді. Бір осьті сығуға арналған үлгілерді сынақ машинасында барынша мүмкін болатын ең жоғарғы күш қолдану үлгілердің бұзылуына алып келген жоқ. Сол себепті беріктіктің шартты шегін анықтау мүмкін болмады.

ҚОРЫТЫНДЫ

Бүгінгі таңда бағдарламалық жасақтама нарығы зерттеушілерге белгілі бір ғылыми салада, соның ішінде материалтану саласындағы мәселелерді шешуге және жаңа перспективті материалдарды жасауға дайын бірқатар бағдарламаларды ұсынып отыр. Көптеген жағдайларда бұл бағдарламалардың негізгі жұмыс бағыты сандық модельдеу және есептеу болып табылады. Қазіргі уақытта материалдарды зерттеуге және оларды тиімді әзірлеуге мүмкіндік беретін бірқатар бағдарламалар бар. Олардың ішінде Thermo-Calc (Швеция) сияқты компаниялардың бағдарламалық өнімдерін ерекше атап өтуге болады.

Диссертациялық жұмыста ұсынылған Thermo-Calc бағдарламалық өнімін қолдана отырып, титан негізіндегі перспективті қорытпаларды жасау әдісі көп уақыт пен қаржылық ресурстарды қажет етпейді. Thermo-Calc бағдарламасы титан негізіндегі қорытпалардың фазалық құрамын талдауда өте қолайлы құрал ретінде ұсынылуда. Бұл бағдарлама кез-келген бөлімді құруға ғана емес, сонымен қатар әртүрлі температурада қорытпаның фазалық құрамын сандық деңгейде есептеуге мүмкіндік береді (фазалардың массалық және көлемдік үлестері, сондай-ақ олардағы элементтердің концентрациясы).

Диссертациялық жұмыстың барысында орындалған жұмыс нәтижелері:

Төрт компонентті Ti-Al-Nb-Mo жүйесі таңдалды және ниобий мен молибден қосымша легірлеуші элемент ретінде қолдануға негізделді. Ниобий қорытпаның беріктігі мен пластикалық қасиеттеріне комплесті әсер етеді, β фазаның түзілуін жеңілдетеді, гамма фазасын тұрақтандырады және оның аймағын кеңейтеді. Молибден γ -фазаның температуралық аймағын кеңейтеді және жұмыс температурасының аралығын арттырады.

«Arc 200» маркалы сумен салқындатылатын мысты тигелі бар зертханалық вакуумдық доға пешінде титан қорытпасы алынды және механикалық сынауға арналған жазық үлгілер дайындалды. Статикалық созылу және сығылу кезіндегі беріктік пен икемділікті өлшеу, жұмыс температурасында қорытпаның беріктік сипаттамалары аналогтық қорытпадан жоғары екенін көрсетті, яғни, механикалық және технологиялық қасиеттері бойынша жасалған қорытпа титан негізіндегі заманауи өнеркәсіптік көп компонентті қорытпалардан кем түспейді.

Al-Nb және Al-Mo лигатураларының құрамын оңтайландыру бойынша эксперименттер жүргізілді, ол гамма-қорытпаларды дайындау кезінде оларды пайдалану үшін қажетті қасиеттер жиынтығын қамтамасыз етеді. Лигатуралардың балқу температурасы мен тығыздығын титан мен гамма-қорытпалардың параметрлерімен салыстыруға болады, бұл легірлеуші элементтердің тиімді сіңуіне және олардың балқыманың көлемінде біркелкі таралуына кепілдік береді. Лигатуралардың төмен жылу сыйымдылығы мен

жылу өткізгіштігі олардың тез еруіне ықпал етеді. Жоғары электр кедергісі бұл процесті вакуумдық доғалы пештерде күшейтеді.

Thermo-Calc бағдарламалық өнімі арқылы есептелген, 40 және 43% алюминий концентрациясы бар политермиялық және изотермиялық қималар тұрғызылды. Алюминий мөлшері 43% болған кезде γ -фазаның аймағы кеңейіп, оның тұрақтылығы артады. Сонымен қатар, оның өңделіп жатқан қорытпаның эксплуатациялық және технологиялық қасиеттерін төмендететін 40% Al бар қорытпадан айырмашылығы, жұмыс істейтін температураға жақын жерде сынғыш σ -фаза пайда болмайды. Оптималды концентрация ретінде - Ti-43Al-4Nb-1Mo таңдалып алынды.

Жоғары температуралы күйдіру арқылы жойылмайтын титан қорытпаларына тән жоғары кеуектілік құйма күйінде сақталады. Оны жою үшін термиялық өңдеудің жаңа режимін қолдану ұсынылды, атап айтқанда 1250 °C температурада ыстық изотермиялық престеу (ГИП) режимінде термомеханикалық өңдеу, содан кейін 800°C температурада күйдіру және ауада салқындату. Таңдалған термиялық өңдеу режимінің нәтижесінде қорытпаның кеуектілігі төмендеп, оның сапасы жақсарды.

ПАЙДАЛАНЫЛГАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- 1 Различные виды классификации отечественных титановых сплавов / Егорова Ю.Б. [и др.] // Титан, 2012. - №2 (36). - С.11-18.
- 2 Солонина О.П., Глазунов С.Г. Современные жаропрочные титановые сплавы и перспективы их применения в двигателях.– М.: Металлургия, 1974 г.
- 3 Титановые сплавы для автомобилестроения / Егорова Ю.Б. [и др.] // Материалы 3-й Международной научно-практ. конференции «Современное машиностроение. Наука и образование», 20-21.06.2013 – СПб: Изд-во Политехн.ун-та, 2013. - С.1137-1146.
- 4 Титан и титановые сплавы в автомобилестроении / Егорова Ю.Б. [и др.] // Автомобильная промышленность, 2010. - № 10. - С. 41-43.
- 5 Брун М.Я. Разработка принципов управления структурой и механическими свойствами жаропрочных $\alpha+\beta$ – титановых сплавов и повышение на этой основе характеристик работоспособности полуфабрикатов для авиационных двигателей. Автореферат диссертации на соискание уч.ст. д.т.н. – Москва.: ВИЛС, 1990. – 51 с.
- 6 Лех Г.И. Исследование влияния режимов деформации и термической обработки на структуру, фазовый состав и комплекс механических свойств нового жаропрочного титанового сплава ВТ18УОП и разработка металлургических основ производства штамповок дисков из этого сплава для новых авиационных двигателей. Автореферат диссертации на соискание уч.ст. к.т.н. – Москва.: ВИЛС, 1992. – 25 с.
- 7 Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов. Титановые сплавы // Электронная версия на сайте https://viam.ru/about_alloys
- 8 Moiseyev V. N. Advances in Metallic Alloys Volume 5 Titanium Alloys: Russian Aircraft and Aerospace Applications Taylor & Francis Group, LLC 2006.
- 9 Sysoeva N. V., Moiseev V. N. High-strength granulated titanium alloys with the intermetallic type of hardening // Metal Science and Heat Treatment Vol. 44, Issues 7 – 8.-2002.- P. 304-308.
- 10 Onodera H., Ohno K., Yamagata T. Effect of β -stabilizer content on tensile properties of $\alpha+\beta$ Titanium Alloys // Transactions of Nat. Research Institute for metals, 1988. - V.30. - №2. - P. 1-8.
- 11 Pan Wang, Jining Qin, Weijie Lu and Yifei Chen. Creep Behavior of In Situ Synthesized 7715D Titanium Matrix Composite Materials Transactions, Vol. 50, No. 6.-2009.-P.1411 -1417.
- 12 Illarionov I.I. Effect of temperature on physical and mechanical properties of an alloy in the Ti-Al-W-Zr system // Metal Science and Heat Treatment Vol. 40, Nos. 11 – 12.-1998.- P. 493-496.
- 13 Illarionov I.I. Relation between phase transformations and mechanical properties of alloys in the Ti-Al- W- Zr system // Metal Science and Heat Treatment 1, bl. 42, Nos. 1 2.- 2000.-P. 31-36.

14 Illarionov I.I. Relation between physical properties and phase transformations in alloys of the Ti-W-Zr-Al system//Metal Science and Heat Treatment Vol 39. Nos. 11 – 12.-1997.-P. 489-492.

15 Логачев И.А. Исследование режима легирования и процесса плавки жаропрочного титанового сплава СТ6У с целью совершенствования технологии и повышения служебных характеристик готового изделия//М.:2014.-25 с.

16 Qiang F., Kou H., Yang G, Tang B., Li J. Multi-step heat treatment design for nano-scale lamellar structures of a cast Ti-45Al-8.5Nb-(W, B, Y) alloy// Intermetallics, 2016.- V. 79.- P. 35-40.

17 Bondarev B.I., Elagin D.V., Molotkov A.V. and Notkin A.B. Metal Science and Engineering Aspects of TiAl-based Binary Alloys Investigations // in Y.-W. Kim, et al., eds., Gamma Titanium Aluminides (Warrendale, PA: TMS, 1995), P.803-810.

18 Park S.Y., Seo D.Y., Kim S.W., Kim S.E., Hong J.K., Lee D.B. High temperature oxidation of Ti-46Al-6Nb-0.5W-0.5Cr-0.3Si-0.1C alloy// Intermetallics, 2016.- V.74.- P. 8-14.

19 Hartfield-Wunsh S.E., Sperling A.A., Morrison R.S., Dowling Jr W.E., and Allison J.E. Titanium Aluminide Automotive Engine Valves // in Y.-W. Kim, et al., eds., Gamma Titanium Aluminides (Warrendale, PA: TMS, 1995), P.41-52.

20 Austin C.M., Kelly T.J., McAllister K.G. and Chesnutt J.C. Aircraft Engine Applications for Gamma Titanium Aluminide // in M.V. Nathal, et.al., eds., Structural Intermetallics (Warrendale, PA: TMS, 1997) ,P.413-425.

21 Dim Arai M., Imamura R., Matsuda K., Nakagava Y., and Hosokawa T. Development of TiAl Blades for Large Low Pressure Turbine // Materia Japan, 1997.- V.36.- P.394-369.

22 Pettersson B., Axelsson P., Andersson M. and Holmquist M. Cast XDTM Gamma Titanium Aluminide Turbine Blade Dampers // in Y.-W. Kim, et al., eds., Gamma Titanium Aluminides (Warrendale, PA: TMS, 1995), P.33-40.

23 Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России // Металлы Евразии, 2012. -№3.- С. 10–15.

24 Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года//Авиационные материалы и технологии, 2012.- №5. -С. 7–17.

25 Kainuma R., Fujita Y., Mitsui H., Ohnuma I., Ishida K. Phase equilibria among α (hcp), β (bcc) and γ (L10) phases in Ti–Al base ternary alloys// Intermetallics, 2000.- V. 8.- P. 855-867.

26 Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства: Справочник.– М.: ВИЛС-МАТИ, 2009.

27 Wang Y., Wang J.N., Yang J., Zhang B. Control of a fine-grained microstructure for cast high-Cr TiAl alloys // Materials Science and Engineering.- A. 392.-2005.- P. 235.

- 28 О.М.Баннх, К.Б.Поварова, Г.С.Браславская, С.Б.Масленков, М.Н.Богатова. Механические свойства литых сплавов γ -TiAl //Металловедение и термическая обработка металлов, 1996.- № 4.-С.11-14.
- 29 Liu C.T., Schneibel J.H., Maziasz P.J., Wright J.L. and Easton D.S. Tensile properties and fracture toughness of TiAl alloys with controlled microstructures // Intermetallics, 1996. -V.4. -P.429-440.
- 30 Schwaighofer E., Clemens H., Mayer S., Lindemann J., Klose J., Smarsly W., Güther V. Microstructural design and mechanical properties of a cast and heat-treated intermetallic multi-phase γ -TiAl based alloy // Intermetallics, 2014.- V.44.- P.128-140.
- 31 Дашкевич Н. И. Исследование фазового состава и разработка новой технологии приготовления многокомпонентных сплавов на основе титана с целью получить фасонных отливок с заданным комплексом служебных свойств//М.:2018.-С.11-13
- 32 Ночовная Н.А., Панин П.В., Кочетков А.С.,Боков К.А. Современные жаропрочные сплавы на основе гамма-алюминидов титана: перспективы разработки и применения // Металловедение и термическая обработка металлов, 2014, -№ 7,- С.23-27.
- 33 Белов Н.А., Белов В.Д., Дашкевич Н.И. «Фазовый состав многокомпонентных гамма-сплавов на основе алюминидов титана», Издательство ВИАМ, 2018 г, 348 с.
- 34 Xiao B. L., Ma Z. Y. Creep behavior of TiBw/Ti and (TiBw+TiCp)/Ti in situ composite // Journal of materials science letters 21, 2002.-P.-859– 861.
- 35 Хорев А.И. Фундаментальные исследования легирования титановых сплавов редкоземельными элементами// Вестник машиностроения, 2011.- №11.-С.54-61.
- 36 Isobe S. and Noda T. Automotive Application of TiAl Intermetallics // in M.V. Nathal, et.al., eds., Structural Intermetallics (Warrendale, PA: TMS, 1997), P.427-433.
- 37 Schneider D., Jewett T., Gente C., Segtrop K., Dahms M. Production of Titanium Aluminide Valves for Automotive Engines by Reactive Sintering // in M.V. Nathal, et.al., eds., Structural Intermetallics (Warrendale, PA: TMS, 1997), P.453-460.
- 38 Tetsui T. Application of Cast Gamma Alloy for Turbochargers // in M.V. Nathal, et.al., eds., Structural Intermetallics (Warrendale, PA: TMS, 1997), P.489-493.
- 39 Preli F., Eßlinger J. Materials for Next Generation Commercial Aircraft Engines. // in 4th International Workshop on Titanium Aluminides (Nuremberg, Germany, 2011), 19 p.
- 40 Yoo , M.H. Twinning and mechanical behavior of titanium aluminides and other intermetallics// Intermetallics, 1998. -V. 6, Issues 7–8.- P. 597-602.
- 41 Grytsiv A., Rogl P., Schmidt H. and Giester G. Constitution of the Ternary System Al-Ru-Ti (Aluminum-Ruthenium-Titanium), J. Phase Equilib., 2003. -V. 24. -P. 511-527.

- 42 Raghavan V. Al-Ti-V (Aluminum-Titanium-Vanadium) // Journal of Phase Equilibria and Diffusion. 2005. -V. 26, Issue 3.- P. 276–279.
- 43 Kitkamthorn U., Zhang L.C., Aindow M. The structure of ribbon borides in a Ti-44Al-4Nb-4Zr-1B alloy // Intermetallics. 2006. -V. 14. – 759 p.
- 44 Sibus, H. Titanium and Titanium, Alloys (eds C. Leyens and M. Peters), Wiley - VCH , Weinheim ,2003.-231 p.
- 45 Электронная информация на сайте www.thermocalc.com.
- 46 Кауфман Л., Бернштейн Г., Расчет диаграмм состояния с помощью ЭВМ, пер. с англ., М., 1972.
- 47 Агеев Н.В. Диаграммы состояния металлических систем.-М.: ВИНТИ, № 1-24.- 1959-1980 г.
- 48 Xinhua Wu. Review of alloy and process development of TiAl alloys // Intermetallics 14. - 2006. – 1114 p.
- 49 Гиббс Дж. В. Термодинамика. Статистическая механика. М.: Наука, 1982.– С. 584.
- 50 Andersson J.O., Helander T., Hoglund T. THERMO-CALC&DICTRA, Computational Tools For Materials Science // CALPHAD. – 2002.-Vol.26, №2. – P.273-312.
- 51 KainumaR., FujitaY., MitsuiH.,OhnumaI., IshidaK. Phaseequilibriaamong α (hcp), β (bcc) and γ (L10) phases in Ti–Al base ternary alloys// Intermetallics, 2000. -V. 8, -P. 855-867 .
- 52 Li B.H., Chen Y.Y., Hou Z.Q., Kong F.T. Microstructure and mechanical properties of cast Ti-43Al-9V-0,3Y alloy // Journal of Alloys and Compounds, 2009. -V.473.- P.123-126.
- 53 Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник. Т.1/под общ. ред. Н.П. Лякишева.- М.: Машиностроение,1996.-992 с.