

## АННОТАЦИЯ

философия докторы (PhD) ғылыми дәрежесін алу үшін «8D07202 – «Қара және түсті металдар металлургиясы» мамандығы бойынша диссертациясына

**ПОПОВ ФЕДОР ЕВГЕНЬЕВИЧ**

### **ЯДРОЛЫҚ ЭНЕРГЕТИКАДА ПАЙДАЛАНУ ҮШІН ДИСПЕРСТІ-АРМАТУРАЛАНҒАН БОЛАТ АЛУ ТЕХНОЛОГИЯСЫН ӘЗІРЛЕУ ЖӘНЕ ЗЕРТТЕУ**

**Тақырыптың өзектілігі.** Ядролық энергетиканың дамуы реакторлардың активті аймағындағы жұмыс температурасы мен қысымының тұрақты артуымен тығыз байланысты. Төртінші буындағы (Gen-IV) жаңа ядролық реакторлар мен болашағы зор термоядролық реакторлардың конструкциялық материалдары жоғары температурада, қысымда және иондаушы сәуле ағынының жоғары қарқындылығы жағдайында жұмыс істеуі тиіс. Сонымен қатар, дәстүрлі конструкциядағы шағын ядролық реакторларды техникалық қызмет көрсетусіз ұзақ уақыт бойы автономды жұмыс істеу мүмкіндігімен экстремалды жағдайларда тұрақты энергиямен қамтамасыз ету мақсатында жасау мәселесі өзекті болып отыр.

Ядролық қондырғылардың қуаты мен ұзақмерзімділігін арттыру, демек, олардың қауіпсіздігін қамтамасыз етудегі басты мәселе — бұл материалдардың агрессивті ортада және жоғары температурада ұзақ уақыт иондаушы сәулеленуге ұшыраған кезде конструкциялық қасиеттерінің бұзылуы. Қазіргі таңда негізгі конструкциялық материал ретінде аустениттік кластағы тот баспайтын болаттар кеңінен қолданылады. Алайда, бұл болаттардың бірқатар кемшіліктері бар. Атап айтқанда, нейтрондық сәулелену кезінде никельдің радионуклидтері секілді ұзақ өмір сүретін радиоактивті изотоптардың пайда болуына байланысты бұл материалдарды пайдалану кейінгі кезеңде қалдықтарды басқаруды күрделендіреді.

Никель қолданбай тот баспайтын болаттың қасиеттерін тұрақтандыру мен жақсартудың бір жолы – құрамына иттрий оксиді ( $Y_2O_3$ ) сияқты дисперсті қатты оксидтер енгізу арқылы оксидтік-дисперстік беріктетілген болат (ODS-болат) түріндегі нанокомпозиттік материалдар алу. Наноқұрылымды оксидтер феррит-мартенситтік матрицада жоғары тығыздықпен таралып, дислокацияларды және дән шекараларын тұрақтандыруға, сондай-ақ радиациялық нүктелік ақауларды ұстауға ықпал етеді, бұл өз кезегінде материалдың радиациялық төзімділігін арттырады. Осылайша, оксидтік қосылыстар материалдың беріктігін арттырып қана қоймай, оны экстремалды жағдайларда құрылымдық тұрақтылығымен қамтамасыз етеді.

Алайда, мұндай материалдарды алу дәстүрлі ұнтақтық технологиялардың, соның ішінде механикалық легирлеудің технологиялық күрделілігі, жоғары өзіндік құны және өндірістік масштабқа енгізудегі шектеулерімен байланысты қиындықтарға тап болады. Қазіргі кезеңде дәстүрлі металлургия әдістері де болат матрицасына иттрий оксидтерін енгізуге мүмкіндік бермейтіндіктен қажетті материал сапасын қамтамасыз ете алмайды.

Осыған байланысты аталған шектеулерді еңсере алатын жаңа ODS-болаттарды өндіру технологияларын жасау өзекті болып отыр. Болашағы бар бағыттардың бірі — экзогендік және эндогендік әдістерді немесе құрамында иттрий бар легирлеуші қорытпаларды пайдалану арқылы вакуумдық индукциялық балқыту секілді сұйық металлургия әдістерін қолдану. Бұл болат матрицада иттрий оксидінің оң мазмұнымен жоғары пайдалану қасиеттері бар материалдар алуға жол ашады.

Дегенмен, ODS-болаттардың қасиеттерін одан әрі жақсарту үшін қосымша тәсілдерді қарастыру қажет. Мұнда интенсивті пластикалық деформация (ИПД) әдістері көмекке келеді. ИПД әдістері ультраұсақ түйіршікті (ҰҰТ) құрылым алуға мүмкіндік береді, бұл болаттың механикалық және радиациялық қасиеттерін едәуір арттырады. Сұйық металлургия әдістерімен алынған материалдарды ИПД қолдану арқылы терең өңдеу бар технологиялық шектеулерді шешуге және экстремалды жұмыс жағдайларына арналған жоғары сапалы ODS-болаттарды жасауға мүмкіндік береді.

Зерттеу барысында вакуумдық индукциялық балқыту әдісімен ODS-болат құймаларын алу үшін түрлі экзогендік және эндогендік технологиялар кешенді түрде талданып, сынақтан өткізілді. Нәтижесінде, иттрий оксидінің оңтайлы мөлшеріне негізделген ең перспективалы балқыту әдістемесі таңдалды. Алынған болат үлгісіне негізделе отырып, материалдың реологиялық қасиеттерін зерттеу жүргізілді. Бұл ИПД процестерін дәл модельдеу үшін қажетті бірегей деректер базасын құруға мүмкіндік берді. ИПД әдістерін қолдану материалдың механикалық қасиеттерін, соның ішінде беріктік пен пластикалылығын, сондай-ақ жоғары температурада радиациялық төзімділігін арттыруға бағытталған. Мұндай тәсіл аса жауапты детальдарды өндіру үшін жоғары сапалы дайын өнім алуға жол ашады.

Жаңа қорытпаның 600–1200 °С температура мен 0,5–15 с<sup>-1</sup> деформация жылдамдығы аралығындағы реологиялық қасиеттерін зерттеу негізінде соңғы элементтер әдісімен деформациялық өңдеу процестерін компьютерлік модельдеу үшін мәліметтер базасы құрылды. Модельдеу нәтижелері бойынша түйір құрылымын тиімді ұсақтайтын және механикалық қасиеттерді жақсартатын ИПД-ның ең тиімді әдісі ретінде радиалды-ығыстырмалы прокат таңдалды.

800 °С-тан кем емес температурада және 6,05 созу коэффициентінде радиалды-ығыстырмалы прокат технологиясы тәжірибелік тексеруден өтті. Нәтижесінде түйір өлшемі 400–800 нм болатын ҰҰТ құрылымы және жақсартылған механикалық қасиеттері бар материал алу мүмкіндігі көрсетілді. Бұл әдістің құйма құрылымының трансформациясына және кристалдық тор ақауларының эволюциясына әсері алғаш рет егжей-тегжейлі зерттелді.

Жаңа материалды ядролық энергетикада қолдану және оны алудың ұсынылған технологиясының негізделуі реакторлардың қауіпсіздігі мен тиімділігін арттыруда үлкен маңызға ие. Бұл зерттеу қазіргі заманғы материалтану ғылымының басымдықтарына сай келетін және атом өнеркәсібінің қажеттіліктеріне жауап беретін жаңа жоғары берікті материалдарды жасау бойынша ғылыми-техникалық бағытты дамытуға өз үлесін қосады.

Осылайша, диссертациялық жұмыс тақырыбы — ядролық энергетиканың өзекті мәселелерін шешуге бағытталған, инновациялық материалдар мен оларды алудың жаңа технологияларын әзірлеуге арналған маңызды және сұранысқа ие ғылыми бағыт.

#### **Зерттеудің мақсаты мен міндеттері.**

**Зерттеудің мақсаты** - дисперсиялық арматураланған болат құймаларын өндіру және олардың құрылымын ядролық энергия үшін материал ретінде перспективалы пайдалану үшін ультра ұсақ түйіршікті күйге дейін жақсарту технологиясын зерттеу және әзірлеу.

**Қойылған мақсатқа қол жеткізу үшін келесі зерттеу міндеттері анықталды:**

1. Дисперсиялық арматураланған болат (ОБС болат) алудың қолданыстағы әдістеріне және құймалардың құрылымы мен қасиеттерін жақсарту әдістеріне кешенді әдебиет және патенттік талдау жүргізу;

2. Итрий оксидін балқымаға енгізудің әртүрлі экзогендік және эндогендік әдістерін дәйекті эксперименттік зерттеу, болат матрицасында оксид қосындыларының тұрақты түзілуінің ең тиімді шарттарын анықтау және анықтау арқылы болат матрицасында итрий оксиді қосындыларын қалыптастыру әдістерін зерттеу;

3. Мәліметтер қорын құру және құйма қысымымен өңдеуді компьютерлік модельдеу үшін алынған құйма материалының реологиялық қасиеттерін зерттеу.

4. Деформацияның әрбір сатысында ақаулар дамуының егжей-тегжейлі талдауын жүргізе отырып, жаңа технология бойынша өндірілген құймадағы құйма ақауларының эволюциясына радиалды ығысу прокатының әсерін зерттеу.

5. Қасиеттері жақсартылған материалдың ультра ұсақ түйіршікті құрылымын қалыптастыру мақсатында құрамында итрий оксидінің

нығайтқыш бөлшектері бар болат құймаларының құйма құрылымының эволюциясына радиалды ығысу прокатының қарқынды пластикалық деформациясының әсерін зерттеу.

**Зерттеу нысаны** - құрылымы мен қасиеттерін жақсарту үшін интенсивті пластикалық деформация әдістерін қолдана отырып, дисперсиялық арматураланған болат құймаларын алу және кейіннен өңдеу технологиясы.

**Диссертациялық жұмыстың пәні** – атом энергетикасы саласында бөлшектерді өндіруге арналған жоғары сапалы дайындамаларды дайындау үшін құю және кейіннен осы құйманы қарқынды пластикалық деформациялау әдістерімен өңдеу арқылы иттрий оксидінің күшейтетін қосындылары бар құйманы алуды зерттеу.

### **Зерттеу әдістері.**

Зерттеу әдістеріне ODS болатын өндірудің, құймаларды алу үшін индукциялық вакуумдық пеште балқытудың және материалдың микроқұрылымы мен морфологиясын зерттеу үшін оптикалық микроскопияны (ОМ), сканерлеуші электрондық микроскопияны (SEM) және трансмиссиялық электрондық микроскопияны (TEM) пайдаланудың қазіргі тәсілдерін шолу үшін әдебиет шолуы кірді. SEM және TEM бойынша энергетикалық-дисперсиялық спектроскопия (EDS) элементтік құрамы мен иттрийдің металл матрицадағы таралуын талдау үшін пайдаланылды, ал SAED (тандалған аймақ электронының дифракциясы) және EBSD (электрондық кері шашырау) талдауы материалдың текстурасы мен кристаллографиялық түйіршіктерін анықтау үшін пайдаланылды. Алынған материалдың реологиялық қасиеттері қасиет деректер базасын құру үшін пластометрдің көмегімен зерттелді, содан кейін ол деформация параметрлерін оңтайландыру үшін илемдеу процестерін соңғы элементтерді модельдеуде (FEM) пайдаланылды. Құйма микроқұрылымын жақсарту үшін радиалды ығысу прокат (RSR) қолданылды. CAD ақаулық үлгілеріндегі ақаулардың көлденең қималарына негізделген көлемді қайта құруды пайдалана отырып, 3D эволюциясының талдауы әрбір айналдыру сатысында құрылымдық өзгерістерді визуализациялау үшін пайдаланылды. Бұл кешенді тәсіл ODS болат өндіру әдістерін және олардың сипаттамаларын терең зерттеуге мүмкіндік берді.

### **Мәселенің ғылыми тұрғыдан зерттелу дәрежесі.**

Аталған салада теориялық және тәжірибелік жұмыстарды қамтитын бірқатар зерттеулер жүргізілгеніне қарамастан, қазіргі қолданылып жүрген ODS-болаттарды алу технологиялары құрылымның біртектілігі мен соған сәйкес механикалық қасиеттердің қажетті деңгейін кең ауқымда қамтамасыз ете алмайды және оларды өнеркәсіптік ауқымда өндіруге жеткіліксіз.

Оксидтік қосылыстардың болат матрицасында біркелкі таралуын қамтамасыз ету және оларды кейінгі өңдеу кезінде тұрақты күйде сақтау мәселелері әлі де өзектілігін жоғалтқан жоқ. Реакторлардың конструкциялық

материалдарына қойылатын талаптардың артуына байланысты құрылымды қалыптастыру және беріктетуші бөлшектерді диспергилеу әдістерін тереңдете зерттеу қажеттігі туындайды.

Бұл бағытта материалдардың қасиеттерінің тұрақтылығын қамтамасыз етіп, оларды өнеркәсіптік деңгейде өндіруге мүмкіндік беретін технологияларды жетілдіру мен жаңа әдістерді әзірлеу үшін қосымша теориялық және тәжірибелік зерттеулер жүргізу талап етіледі.

### **Қорғауға шығарылатын негізгі тұжырымдар**

Жүргізілген зерттеулер негізінде диссертацияның келесі ғылыми ұсыныстары тұжырымдалды:

1. Итрий оксидінің дисперсті бөлшектерін балқымаға экзогенді түрде тікелей енгізудің мүмкін еместігі иттрий оксиді бөлшектерінің болат балқымасымен әлсіз әрекеттесуіне байланысты анықталды.

2. Болаттағы дисперсті иттрий оксидінің бөлшектерін күшейтудің эндогендік түзілуінің жаңа технологиясы жасалды. Бұл технология металл иттрийінің балқыту кезінде тікелей тотығуына және одан кейін радиалды ығысу прокатының көмегімен құйманы қарқынды деформациялық өндеуге негізделген.

3. Болат құймасындағы көлденең өтпелі ақаулардың эволюциясы алғаш рет радиалды ығысу прокатының көмегімен зерттелді.

4. Өте ұсақ түйіршікті күйге жету және материал қасиеттерін жақсартуда  $Y_2O_3$  бөлшектерін күшейтетін болат құймаларын радиалды ығысу прокатының тиімділігі тәжірибе жүзінде расталды..

### **Зерттеудің ғылыми жаңалығы**

1. Эксперименталды түрде болат балқымаға экзогенді иттрий оксиді бөлшектерін тікелей енгізудің төмен тиімділігі анықталды. Бұл бөлшектердің сулану бұрышының  $120^\circ$ -тан жоғары болуымен және енгізілетін бөлшектердің ( $5,01 \text{ г/см}^3$ ) тығыздығы мен болат балқымасының тығыздығы ( $7,9 \text{ г/см}^3$ ) арасындағы 1,58 еселік айырмашылықпен түсіндіріледі.

2. Болат балқымасында эндогенді түрде иттрий оксиді бөлшектерін қалыптастыруды қамтамасыз ететін балқыту технологиялық параметрлері анықталды: температура –  $1550 \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ , ұсталу уақыты – 1 минут, енгізілген иттрий мөлшері – 2%.

3. Алғаш рет  $0,5 \text{ с}^{-1} - 15 \text{ с}^{-1}$  деформация жылдамдықтары және  $600 \text{ }^\circ\text{C} - 1200 \text{ }^\circ\text{C}$  температура диапазонында иттрий оксиді арматуралаушы бөлшектері бар болаттың ағымдық қисықтарының деректер базасы алынды.

4. Иттрий оксидінің беріктендіруші бөлшектері бар болат құймаларының құймалық құрылымының эволюциясына радиалды-сырғу прокаттауының тиімді әсері анықталды. Нәтижесінде дән өлшемі  $400-800 \text{ нм}$  болатын ультрамелкозернисті құрылым қалыптасатыны көрсетілді.

5. Дисперсті-армаланған болат құймасын радиалды-сырғу прокаттау әдісімен жеделдетіп өңдеу мүмкіндігі айқындалды, бұл модельдік сквозной ақау көлемін бастапқы 480 мм<sup>3</sup>-тен 155 мм<sup>3</sup>-ке дейін азайтуға мүмкіндік берді.

### **Зерттеудің теориялық және практикалық маңыздылығы**

Бұл диссертацияның теориялық және практикалық маңызы бар. Итрий оксидінің бөлшектерін күшейтетін болат алудың жаңа технологиясы әзірленді. Бұл технология балқымаға металл иттрийін енгізуді, одан кейін оның эндогендік тотығуын, құюды және алынған құйманы радиалды ығысу арқылы өңдеуді қамтиды. Бұл технология атом энергетикасында құрылымдық материал ретінде өнеркәсіптік пайдалану үшін ауқымдылық мүмкіндігіне ие. 12X13 маркалы болаттың болат матрицасына иттрий оксидін енгізудің жаңа тәсілдері зерттелді. Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> қосындылары бар балқытылған болаттың реологиялық қасиеттерінің деректер базасы алынды және пластикалық деформация процестерін модельдеу және радиалды ығысу прокатының оңтайлы параметрлерін анықтау үшін пайдаланылды. Құрылған деректер базасының негізінде болаттағы пластикалық деформация процестері имитацияланды. РСР-ның болаттың микроқұрылымына және механикалық қасиеттеріне әсері, сонымен қатар құйма құрылымындағы фрагментация процестері зерттелді. Тәжірибелік тұрғыдан алғанда, жоғары температурада және радиацияға ұшыраған қолданбаларға жарамдылығын қамтамасыз ететін ODS болаттарын өндіру технологиясы әзірленді. Беріктік пен механикалық қасиеттерді жақсартатын ультра ұсақ түйіршікті құрылымды қалыптастыру үшін радиалды ығысу прокатын қолданудың орындылығы расталды. Металл иттрийін балқыту процесінде тотықтыру технологиясы оның ауқымдылығы және қолданыстағы жабдықпен үйлесімділігі арқасында өнеркәсіптік әлеуетке ие. Алынған нәтижелер атом энергетикасы, аэроғарыш және энергетика үшін жаңа құрылымдық материалдарды әзірлеуде, сондай-ақ экстремалды жағдайларда пайдалану сенімділігін арттыру үшін қолданылуы мүмкін.

**Диссертацияның негізгі тезистері** ғылыми-практикалық конференцияларда баяндалып, Scopus және KKSON (Білім беру мекемелерін бақылау және бағалау комитеті) басылымдарында жарияланды.

Диссертация Қарағанды индустриалды университетінің металлургия және машина жасау факультетінің металлургия және материалтану кафедрасында орындалған.

**Басылымдар:** Диссертация тақырыбы бойынша сегіз мақала жарық көрді. Оның бесеуі Scopus және Web of Science деректер қорында, екеуі халықаралық ғылыми-тәжірибелік конференциялар жинағында, біреуі Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігі Білім және ғылым сапасын қамтамасыз ету комитеті ұсынған жарияланымдарда.

Scopus және Web of Science дерекқорларындағы жарияланымдар тізімі:

1. Arbuz A., Kawalek A., Panichkin A., Ozhmegov K., Popov F., Lutchenko N. Using the radial shear rolling method for fast and deep processing technology of a steel ingot cast structure // *Materials*. 2023. Vol. 16. No. 24. Article No. 7547.(Q1-Web of Science)

2. Arbuz A., Panichkin A., Popov F., Kawalek A., Ozhmegov K., Lutchenko N. Modeling the evolution of casting defect closure in ingots through radial shear rolling processing // *Metals*. 2024. Vol. 14. No. 1. Article No. 53(Q2-Web of Science).

3. Arbuz A. S., Panichkin A. V., Popov F. E., Lutchenko N. A., Volokitina I. E. Using the radial shear rolling method for deep development of the cast structure of ingots of special materials // *Metallurgist*. 2024. Vol. 67. No. 11-12. P. 1826–1836(Q4-Web of Science).

4. Popov F., Lutchenko N., Panichkin A., Lezhnev S., Panin E., Vinogradov L., Arbuz A. Modelling the evolution of casting defect closure by radial shear rolling // *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2024. Vol. 59. No. 1. P. 197–206. (34 Перцентиль – Scopus)

5. Panichkin A., Popov F., Lutchenko N., Beldeubayev A., Samokhvalov I., Arbuz A. Research of injection methods for  $Y_2O_3$  nanoparticles into nickel-free stainless steel during induction vacuum remelting // *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2024. Vol. 59. No. 1. P. 173–182.(34 Перцентиль – Scopus)

Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Білім және ғылым саласындағы сапаны қамтамасыз ету комитеті ұсынған басылымдардағы жарияланымдар тізімі:

1. Найзабеков А.Б., Попов Ф.Е., Паничкин А.В., Лежнев С.Н., Арбуз А.С. Моделирование применимости метода радиально-сдвиговой прокатки для закрытия дефектов литой структуры стального слитка // *Труды университета*. – 2023. – №4(93). – С. 67-71.

Халықаралық ғылыми конференцияларда жасалған баяндамалар тізімі:

1. Popov F., Panichkin A., Lutchenko N., Beldeubayev A., Samokhvalov I., Arbuz A. The Various Ways Injection of  $Y_2O_3$  Particles into the Nickel-Free Stainless-Steel Melt by Experimental Vacuum Induction Melting // *METAL Conference Proceedings*. 2023.

2. Попов Ф., Паничкин А., Лученко Н., Белдеубаев А., Самохвалов И., Арбуз А. Введение частиц  $Y_2O_3$  в расплав безникелевой нержавеющей стали методом вакуумной индукционной плавки // *Proceedings 32nd International Conference on Metallurgy and Materials*. – 2024. – С. 59–63.

**Диссертацияның ғылыми-зерттеу бағдарламаларымен байланысы:** Бұл диссертация № АР09259982 «Ядролық инженерияда пайдалану үшін оксид-дисперсиялық күшейтілген болатты алу және өңдеу технологиясын әзірлеу және зерттеу» гранты бойынша орындалды.

**Диссертацияның құрылымы.** Диссертация кіріспеден, төрт бөлімнен және қорытындыдан тұрады, 149 беттен тұрады. Онда 85 сурет, бір кесте, 202 әдебиет және төрт қосымша бар.