

Арман Жанарбекович Миниязовтың

8D05302 – «Техникалық физика» білім беру бағдарламасы бойынша философия докторы (PhD) дәрежесін алу үшін дайындаған диссертациясына

АНДАТПА

Термиялық және плазмалық әсерлердің вольфрамның бетіне жақын карбидті қабатының құрылымдық күйі мен қасиеттеріне ықпалы.

Жұмыстың жалпы сипаттамасы

Диссертациялық жұмыс жылулық жүктеме және гелий плазмасы әсерінен кейін вольфрам бетіне жақын карбидті қабатының құрылымдық күйі мен қасиеттерінің өзгерулерін зерттеуге арналған. Жұмыс нәтижелері бойынша карбид қабаты бар вольфрамды жоғары температурада сынау тәсілі әзірленді және жоғары жылу жүктемесі мен гелий плазмасымен сәулелендірудің вольфрамның бетіне жақын карбидті қабатының құрылымдық күйі мен қасиеттеріне әсер ету заңдылықтары белгіленді.

Зерттеу тақырыбының өзектілігі

Белгілі болғандай, қазіргі уақытта термоядролық технологияларды дамыту саласында әзірленетін термоядролық синтез қондырғылары үшін бірінші қабырға мен дивертордың конструкциялық материалдары ретінде вольфрам мен оның қорытпаларын қолдану белсенді зерделенуде. Плазманың бетімен өзара әрекеттесуін зерттеу және ең бастысы термоядролық қондырғыны шынайы пайдалану жағдайында конструкциялық материалдардың беталысын болжау, плазманың бірінші қабырғамен және дивертордың қорғаныш қаптамасымен өзара әрекеттесуі саласында кешенді процестердің қалыптасуымен қиындайды. Осы процестердің өнімдері, оның ішінде эрозия термоядролық қондырғының диверторлық саласында жиналады.

Бірінші қабырғасы графитпен қапталған термоядролық қондырғыларды (JT-60, КТМ Токамагы) пайдалану кезінде құрамында көміртегі бар материалдардың эрозиясы, содан кейін басқа да конструкциялық материалдардың бетінде эрозияға ұшыраған көміртегі бөлшектерінің тұнбасы проблема тудырады. Плазмада осы эрозияға ұшыраған бөлшектер жоғары қуатты электрондардың әсерінен иондануға ұшырайды, содан кейін сутегі изотоптарымен бірге конструкциялық вольфрамның плазмаға қаратылған бетімен өзара әрекеттеседі. Плазманың материалдарға әсер етуінің нәтижесі олардың шашырауы мен булануы, құрылымы мен фазалық күйінің өзгеруі, сондай-ақ бетінде жаңа химиялық қосылыстардың пайда болуы. Бұл ретте плазманың әсер ету параметрлеріне байланысты вольфрамның бетіне жақын карбид қабатының пайда болуы мүмкін. Бұл факторлар плазмаға қаратылған материалдардың шекаралас плазмадағы сутегі изотоптарымен өзара әрекеттесуіне әсер етуі мүмкін.

Бүгінгі таңда ғалымдарға плазмалық сәулелендіру нәтижесінде вольфрамның пайдалану сипаттамаларына бетіне жақын карбидтік қосылыстардың әсері мен түзілуін зерттеу міндеттері жүктелді. Токамак негізіндегі термоядролық реакторды құру кезінде үздіксіз және қарқынды жоғары қуатты импульстік плазмалық әсерге төтеп бере алатын құрылымдық

материалдарды таңдау басты міндет болып табылады. Сондықтан, біздің ойымызша, плазмалық ағындардың әсерінен термоядролық қондырғылардағы бірінші қабырғалар мен диверторлық пластиналар үшін қолданылатын материалдардың беттік құрылымының өзгеруін зерттеуге байланысты эксперименттік және теориялық зерттеулердің маңызы зор. Дегенмен, термоядролық реактор плазмасының кандидаттық материалдармен тәжірибелік күрделілігі мен көп қырлы өзара әрекеттестігі, сондай-ақ толық ауқымды табиғи сынақтардың жоғары шығындары мамандандырылған шағын имитациялық қондырғыларды пайдалана отырып, эксперименталды зерттеулерді қажет етеді.

Осы жұмыстың мақсаты: плазмалық сәулелік қондырғыда жоғары температуралы жылудың және плазманың әсер етуі нәтижесінде вольфрамның бетіне жақын карбидті қабатының құрылымдық күйі мен қасиеттерінің негізгі өзгеру ерекшеліктерін анықтау.

Осы мақсатқа қол жеткізу үшін келесі **міндеттер** қойылды және шешілді:

1) жоғары температуралы сәулелену кезінде бетіне жақын карбидті қабаты бар вольфрамдағы температура өрісінің есептік моделін әзірлеу;

2) плазмалық сәулелік қондырғыда электронды-сәулелік қыздыру әдісімен карбидті қабаты бар вольфрамға жоғары жылулық әсер ету тәсілін әзірлеу;

3) жоғары жылу жүктемесінің вольфрамның бетіне жақын карбидті қабатының құрылымдық күйі мен қасиеттеріне әсер ету заңдылықтарын анықтау;

4) гелий плазмасымен жоғары температуралы сәулелендіру нәтижесінде вольфрамның бетіне жақын карбидті қабатының құрылымдық күйі мен қасиеттерінің өзгеруін зерттеу.

Қорғауға шығарылатын негізгі ережелер

1) Плазмалық сәулелену кезінде вольфрамдағы температуралық өрістің таралу сипатына бетіне жақын карбидті қабат айтарлықтай әсер етеді. 10 МВт/м^2 және 20 МВт/м^2 плазмалық сәулеленудің термиялық жүктемесінде карбидті қабаты бар вольфрамның плазмаға қаралған бетіндегі температура сәйкесінше $905 \text{ }^\circ\text{C}$ және $1750 \text{ }^\circ\text{C}$ болатыны анықталды, ал осы жерде карбидті қабаты жоқ вольфрам бетінің температурасы сәйкес плазмалық жүктемелер кезінде $1115 \text{ }^\circ\text{C}$ және $2189 \text{ }^\circ\text{C}$.

2) Жоғары вакуумды және газды орта жағдайларында электронды-сәулелік қыздыру әдісімен бетіне жақын карбид қабаты бар вольфрамға жоғары температуралы әсер ету тәсілі.

Бұл тәсіл плазмалық-шоқты қондырғының вакуумды және газды (гелий) ортада 3 сағат бойы сақталатын және кейіннен бақыланып салқындатылатын ($1 \text{ }^\circ\text{C/c}$) қуатты электронды-сәулелік әсеріне негізделген. Бұл тәсіл $20 \text{ }^\circ\text{C}$ -тан $2500 \text{ }^\circ\text{C}$ -қа дейінгі температура диапазонында және $10 \text{ }^\circ\text{C/c}$ -тан $500 \text{ }^\circ\text{C/c}$ -қа дейінгі жылдамдықта жоғары температуралы қыздыруды қамтамасыз етеді. Өзірленген тәсіл бетіне жақын карбидті қабаты бар вольфрамды жоғары температуралы қыздырудың есептік температурасына және параметрлеріне қол жеткізуге мүмкіндік береді.

3) Жоғары жылу жүктемесінің нәтижесінде вольфрамның бетіне жақын карбидті қабатының құрылымдық күйінің өзгеру ерекшеліктері.

905 °С-тық ($q=10 \text{ МВт/м}^2$) температура кезінде вольфрамның бетіне жақын карбид қабаты құрылымының жоғары термиялық тұрақтылығымен және беткі қабаттың эрозиясына төтеп беретін қасиетімен сипатталатыны белгіленді. 1750 °С ($q=20 \text{ МВт/м}^2$) температурадағы жылу жүктемесі WC карбид қабатының бұзылуына, жарықшақтардың пайда болуына және материалдың беткі құрылымының бұзылуына әкеледі.

4) Гелий плазмасымен жоғары температуралы сәулелендірудің вольфрамның бетіне жақын карбидті қабатының құрылымдық күйі мен қасиеттеріне әсері.

Гелий плазмасымен сәулелендіру кезінде карбидті қабаттар вольфрам бетінің қасиеттеріне теріс әсер етіп, 905 °С температурада корал құрылымы мен гелий көпіршіктерінің түзілуін жеделдететіні анықталды. WC бетіне жақын карбидті қабаты W_2C негізіндегі карбидті қабатына қарағанда гелийдің зақымдауына төзімділігі анағұрлым төмен екені белгіленді. 1750 °С-тық температура кезінде гелиймен сәулелендіру балқыған көтерілімдердің пайда болуымен материал бетіне көлемді зақым келтіреді.

Жұмыстың ғылыми жаңашылдығы:

– алғаш рет вакуумды және газды ортада электр-сәулелік әсер ету әдісімен вольфрамды жоғары температурада сынау тәсілі әзірленді және сыналды (21.10.22 ж. № 35911 өнертабысқа арналған патент №42 бюллетень);

– алғаш рет жоғары жылулық әсердің және гелий плазмасымен жоғары температуралы сәулелендірудің нәтижесінде вольфрамның бетіне жақын карбидті қабатының құрылымдық-фазалық күйінің және қасиеттерінің өзгеру ерекшеліктері белгіленді.

Зерттеу нысаны: жоғары қуатты жылулық және плазмалық әсерлердің жағдайында бетіне жақын карбидті қабаты бар вольфрам.

Зерттеу пәні: термиялық және плазмалық әсерлердің бетіне жақын карбидті қабаты бар вольфрамның құрылымдық күйі мен қасиеттеріне ықпалы.

Зерттеу әдістері

Термодролық реактор диверторының моноблок моделінің температуралық өрісін есептеу және плазмалық сәулелендіру кезінде жылу жүктемесін модельдеу үшін ANSYS бағдарламалық кешені пайдаланылды. Жылулық әсер ету және плазмалық сәулелендіру бойынша эксперименттер плазмалық-шоқты қондырғыда жүргізілді. Эксперименттерде оптикалық спектрометрия және масс-спектрметрлік әдістері, температураны бақылаудың түйіспелі және түйіспесіз әдістері, плазманың вольтамперлік сипаттамаларын анықтау үшін зондты диагностика әдісі қолданылды. Үлгіде газдардың жиналуын талдау үшін термодесорбция әдісі қолданылды. Үлгілердің құрылымдық және фазалық күйін зерттеу металлографиялық және микроқұрылымдық талдау әдістерін, соның ішінде оптикалық, сканерлеу және сәулелендіруші электронды микроскопия, сондай-ақ рентгенқұрылымдық талдауды пайдалана отырып жүргізілді. Үлгілердің беткі ауданын анықтау Altami Studio бағдарламалық ортада стереоскопиялық микроскопты пайдалану арқылы жүргізілді. Үлгілердің микроқұрылымын сандық және сапалық бағалау объектілердің микроқұрылымын талдауға арналған AXALIT бағдарламалық қамтамасыз етуді

қолдану арқылы жүргізілді. Элементтік құрамын анықтау рентгенспектрлік микроталдау әдісімен жүргізілді. Үлгілердің физикалық-механикалық қасиеттері Q10A+ автоматты қаттылықты өлшегіште виккерс әдісімен микроқаттылығын, Mettler Toledo MS205DU аналитикалық таразыда массасын және Mitutoyo Surfest SJ-410 профилометрін пайдаланып үлгі бетінің кедір-бұдырлығын өлшеу арқылы зерттелді.

Жұмыстың практикалық маңыздылығы

1) Әзірленген жоғары температуралы қыздыру тәсілі мен плазманың вольфрамның бетіне жақын карбидті қабатымен өзара әрекеттесуін зерттеу әдісі шынайы зерттеулерді жүргізу барысында сыналды және ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалының ғылыми-техникалық қызметінің аясында плазмалық-шоқты қондырғыда құрылымдық материалдарды сынауға арналған эксперименттерді дайындау және жүргізу жұмыстарына енгізілді (24.08.2022 ж. №12-230-02/1579іш. Әдістемені әзірлеу туралы акті. 02.10.2023 ж. №12-230-02/1584іш. Енгізу туралы акті).

2) Диссертациялық жұмыс шеңберінде алынған деректер 12.03.2021 ж. 2021-2023 жылдарға арналған ҚТМ Қазақстандық материалтану токамагындағы ғылыми зерттеулер бағдарламасының міндеттерін іске асыруда пайдаланылуда.

3) Жылу жүктемелері мен плазмалық сәулелендірудің ықпалы кезінде карбидті қабатының вольфрам қасиеттеріне әсері туралы зерттеулердің нәтижелері термоядролық реактор элементтерін әзірлеу және сынау, сонымен қатар жұмыс ресурстарын талдау саласындағы материалтанушыларға ұсынылуы мүмкін.

4) Диссертациялық жұмыстың нәтижелерін «Семей қаласының Шәкәрім атындағы университеті» КЕАҚ Техникалық физика және жылуэнергетикасы кафедрасының оқу үдерісіне енгізу туралы акті алынды.

Автордың жеке үлесі

Автор эксперименттік зерттеулерді жүргізуге және зерттеу әдістерін таңдауға, диссертациялық жұмыстың мақсаты мен міндеттерін қоюға тікелей қатысты, патенттік ізденіс және әдеби шолу нәтижелерін талдады. Диссертациялық зерттеулер жүргізу барысында алынған нәтижелерді талдау, сондай-ақ негізгі қорытындыларды тұжырымдау ғылыми кеңесшілермен бірлесіп орындалды.

Барлық эксперименттік жұмыстар «Қазақстан Республикасының Ұлттық ядролық орталығы» Республикалық мемлекеттік кәсіпорнының (ҚР ҰЯО РМК) «Атом энергиясы институты» филиалының жетекші ғалымдарымен және мамандарымен тығыз ынтымақтастықта жүргізілді.

Жұмыстың ғылыми-зерттеу бағдарламаларымен байланысы

Диссертациялық жұмыс Қазақстан Республикасы Энергетика министрлігінің 036 «Атомдық және энергетикалық жобаларды дамыту» Республикалық бюджеттік бағдарламасының 105 «Атом энергетикасы саласындағы технологиялық сипаттағы қолданбалы ғылыми зерттеулер» кіші бағдарламасы «ҚТМ Қазақстандық материалтану токамагында эксперименттік зерттеулерді ғылыми-техникалық қамтамасыз ету» іс-шарасы шеңберінде

орындалды, онда автор тақырыптың негізгі орындаушысы және жетекшісі ретінде қатысты:

– 2018-2020 жж. 01.01 «Плазмалық-шоқты қондырғысы бар имитациялық стендте плазмаға қаратылған материалдардың қасиеттеріне жабындардың әсерін эксперименттік зерттеу» тақырыбының 01-бөлімі Материалдармен өзара әрекеттесу процесінде КТМ-де зерттеулер жүргізу әдістемесін және КТМ жоғары температуралы плазмасының физикалық параметрлерін бақылау құралдарын пысықтау (мемлекеттік тіркеу №0115PK02433);

– 2021-2023 жж. 02.01 «Плазманың вольфрамның карбидтелген бетімен өзара әрекеттесуін зерттеу» тақырыбының 02-бөлімі Термодролық реактор құру үшін инновациялық технологияларды әзірлеу және эксперименттік негіздеме (мемлекеттік тіркеу №0115PK02433).

Алынған нәтижелердің дұрыстығы және негізділігі дәрежесі жүргізілген есептік-эксперименттік зерттеулердің дұрыстығы мен жүйелілігін қамтамасыз етеді. Бұл нәтижелер Қазақстан Республикасының Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым және жоғары білім саласында сапаны қамтамасыз ету комитеті ұсынған басылымдардағы, сондай-ақ Scopus және Web of Science дерекқорларына енгізілген рецензияланатын шетелдік ғылыми журналдардағы жарияланымдармен, алыс және жақын шетелдердегі халықаралық ғылыми конференциялардың еңбектерімен расталады. Өнертабысқа патент алынды, ол «Ұлттық зияткерлік меншік институты» РМК бюллетенінде жарияланды.

Диссертациялық жұмысты апробациялау

Диссертациялық жұмыстың материалдары ұсынылды және баяндалды:

1) 14-ші халықаралық конференция «Gas Discharge Plasmas and Their Applications», Томск қ., Ресей, 15-21 қыркүйек 2019 ж.

2) 24-ші халықаралық «Иондардың беттермен әрекеттесуі» конференциясы (ISI-2019), Мәскеу қ., Ресей, 19-23 тамыз 2019 ж.

3) «Ядролық ғылым және технологиялар» II Халықаралық ғылыми форумы, ЯФИ, Алматы қ. 24-27 маусым 2019 ж.

4) VII Халықаралық «Energy Fluxes and Radiation Effects» конгрессі (EFRE 2020), Томск қ., Ресей, 14-25 қыркүйек, 2021 ж.

5) 15-ші халықаралық конференция «Gas Discharge Plasmas and Their Applications», Томск қ., Ресей. 5-10 қыркүйек 2021 ж.

6) «Advanced manufacturing materials and research: new technologies and techniques AMM&R2021» Халықаралық онлайн конференциясы, Өскемен қ. 19 ақпан 2021 ж.

7) «Семей полигоны: мұра және ғылыми-техникалық әлеуеттің даму болашағы» IX халықаралық конференциясы., Курчатов қ. 7 – 9 қыркүйек 2021 ж.

8) Постерлік баяндамалар семинар-байқауы «Шәкәрім Постер іс-шарасы». КеАҚ Шәкәрім атындағы университет, Семей қ. 13 сәуір 2022 ж.

9) «Увалиев оқулары – 2022. Заманауи сын-қатерлер контекстіндегі ғылым мен білімнің өзекті мәселелері» халықаралық ғылыми-тәжірибелік конференциясы. Өскемен қ. 23 – 24 қыркүйек, 2022 ж.

10) «Атом энергиясын бейбіт мақсатта пайдалану саласындағы ғылыми-техникалық ынтымақтастыққа 30 жыл» халықаралық ғылыми-техникалық семинар. Курчатов қ. 17-20 мамыр, 2022 ж.

11) «Nanomaterials and Advanced energy storage systems» 10-шы халықаралық конференциясы, Астана қ. 4-6 тамыз, 2022 ж.

12) 32-ші симпозиум «Symposium on Fusion Technology» (SOFT 2022). Дубровник, Хорватия қ. 18-23 қыркүйек, 2022 ж.

13) «Қатты дене физикасы» XV халықаралық конференциясы. Астана қ. 8 – 10 желтоқсан, 2022 ж.

14) Қазақ физика қоғамының үшінші жыл сайынғы жиналысы. Курчатов қ. 7 – 11 маусым, 2023 ж.

15) «Иондардың беттермен әрекеттесуі - ISI2023» XXVI халықаралық конференциясы. Ярославль қ., Ресей. 21-25 тамыз, 2023 ж.

16) «Семей полигоны» халықаралық конференциясы. Курчатов қ. 12 – 14 қыркүйек, 2023 ж.

17) «International Fusion Energy Conference» 29-шы халықаралық конференциясы, Лондон қ., Ұлыбритания, 16-20 қазан, 2023 ж.

Сондай-ақ диссертациялық жұмыстың нәтижелері «Семей қаласының Шәкәрім атындағы университеті» КЕАҚ «Техникалық физика және жылуэнергетикасы» кафедрасының ғылыми семинарларында, ҚР ҰЯО РМК мен «Атом энергиясы институты» филиалының ғылыми-техникалық кеңесінің отырыстарында, сондай-ақ докторанттардың (PhD) семинарларында баяндалды және талқыланды.

Жарияланымдары

Диссертацияда мазмұндалған нәтижелер бойынша барлығы 20 баспа жұмысы, оның ішінде ҚР ҒЖБМ ҒЖБСБК ұсынған ҚР рецензияланатын ғылыми басылымда – 1, Scopus және Web of Science индекстелетін журналдарда – 4, ҰЗМИ РМК өнертабысқа арналған патенті - 1 және халықаралық конференциялардың еңбектер жинақтарында – 12 және басқа да басылымдарда – 2.

Диссертацияның құрылымы мен көлемі

Жұмыс кіріспеден, бес тараудан, қорытынды мен пайдаланылған дереккөздер тізімінен тұрады. 108 парақта мазмұндалған, 46 сурет, 11 кесте және 197 атаудан тұратын пайдаланылған дереккөздер тізімі қамтылған.