

Гайния Қайырдықызы Жанболатованың
8D05301 – «Физика» мамандығы бойынша (PhD) философия докторы
дәрежесін алу үшін дайындаған диссертацияға
АНДАТПА

**Шоқтық-плазмалық разрядтағы карбидизация нәтижесіндегі
вольфрамның құрылымдық-фазалық күйлері**

Жұмыстың жалпы сипаттамасы. Диссертациялық жұмыс әзірленген шоқтық-плазмалық разрядта (ШПР) карбидтеу әдісімен карбидтеуден кейін вольфрамның құрылымдық-фазалық күйлерін зерттеуге арналған. Жұмыста вольфрамның құрылымдық-фазалық күйлеріне карбидтеу жағдайының әсер етуінің негізгі заңдылықтары белгіленді.

Зерттеу тақырыбының өзектілігі. Көптеген жылдар бойы дивертор материал ретінде графитті және көміртекті талшықты композиттерді (CFC) пайдалану токамактардағы разрядтардың ұзақтығын арттыруда, плазманың температурасы мен тығыздығын арттыруда және басқа да бағыттарда айтарлықтай ілгерілуге қол жеткізгені белгілі. Алайда, бүгінгі күні вольфрамның (W) жоғары жылу өткізгіштігіне, жоғары балқу температурасына және құрамында тритийді ұстауының төмендігіне байланысты JET, ASDEX Upgrade, WEST және ITER сияқты бірнеше қолданыстағы және болашақтағы токамактарда пайдалану үшін толығымен вольфрамды дивертор перспективасы жоғары болып табылады. Дегенмен, соңғы жылдардағы зерттеулер жоғары иондық және жылу ағындары бар аймақтар үшін W-ды пайдалану плазманың дивертор бетімен өзара әрекеттесуімен бірге жүретін мәселелерді толық шеше алмайтынын көрсетеді. Сонымен, қарқынды иондық ағындар әсер еткен кезде W эрозиясының жоғарылауы, W-да сутегі изотоптарын (H) қармау және ұстау термоядролық қондырғылардың плазмаға айналатын компоненттерінің қызмет ету мерзімінің қысқаруына әкелуі мүмкін. Сонымен қатар, толық вольфрамды диверторын пайдалану кезіндегі тағы бір мәселе – ~1000 кг деп бағаланатын және қашықтан басқару үшін шекті салмақтан (800 кг) асатын диверторлық кассетаның салмағы. Осылайша, дивертор материал ретінде графит пен CFC-ді пайдалануды толығымен алып тастауға болмайды.

Бірқатар токамактарда, мысалы жапондық JT-60SA токамагында сияқты, графит пен көміртекті графит материалдарына тұндырылған вольфрам жабындары, немесе Қазақстандық КТМ материалтану токамагында сияқты жабынсыз графит материалдары қолданылады. Алайда, тозаңдатылған графит пен көміртекті графит материалдарының эрозиясы мен тасымалдануы H изотоптарымен, көміртегі (C) иондарымен және көмірсутек молекулаларымен W-ның бір мезгілде сәулеленуіне әкеледі, ол вольфрам карбидінің (WC және W₂C) түзілуіне әкелуі мүмкін. Сонымен қатар, плазмалық разрядпен эксперименттер жүргізгеннен кейін графит төсенішіне тұндырылған вольфрам жабынының бетінде WC және W₂C фазалары түзілетіні анықталды. Жоғары температура кезінде төсеніштің C атомдары вольфрам жабынына диффузияланып, нәтижесінде вольфрам карбидін түзеді.

Соған қарамастан, КТМ токамагын пайдалану кезінде С-ны тозаңдату, оны плазмаға және диверторлық үстел аймағына тарату нәтижесінде ТЯР кандидаттық материалдары үлгілерінің бетінде карбидтелген қабаттардың түзілуі осы уақытқа дейін зерттелмеген. КТМ токамагын пайдалану және дұрыс нәтижелер алу үшін эксперименттер жүргізу кезінде ТЯР кандидаттық материалдары үлгілерінің бетімен плазманың өзара әрекеттесуінің барлық мүмкін сценарийін алдын ала зерттеу қажет. Сондықтан бұл ғылыми жұмыстың өзектілігі - КТМ токамагын пайдалану кезінде зерттелетін үлгілерде вольфрам карбидтерінің пайда болу жағдайларын болжауға мүмкіндік беретін, плазмалық-беттік өзара әрекеттесу кезінде беттік карбидтеу процесін эксперименттік зерделеу.

Бұл диссертациялық жұмыста плазмалық-беттік өзара әрекеттесу кезінде беттік карбидтеу процесін зерделеу мақсатында ШПР-ді қолдану арқылы вольфрам бетін карбидтеу әдісі қарастырылады. Алайда көміртектің вольфраммен өзара әрекеттесуін және магнетронды тозаңдату, вольфрам мен көміртектің плазмалық ағындарын араластыру, газ фазасынан көміртекті химиялық тұндыру немесе электронды-сәулелік буландырғыштың көмегімен көміртекті буландыру сияқты аралас қабаттардың түзілуін зерттеудің әртүрлі әдістері белгілі. Дегенмен, таңдалған әдістің бірегейлігі ШПР жақсы бақыланатын жағдайларда плазмаға қаратылған конструкциялық материалдарды алдын ала сынау үшін токамактардың перифериялық плазмасын имитациялаудың оңтайлы әдісі болып табылуы. ШПР-ге тән – сәуле электрондарының едәуір энергиясын плазмаға беру, ол сәуленің соқтығысусыз таралу режимінде іске асырылады және плазма-сәуле жүйесінде ұжымдық өзара әрекеттесумен байланысты. ШПР кез келген жұмыс заттарынан және ерекше қасиеттері бар плазманы алуға мүмкіндік береді. Сондықтан вольфрам бетінде карбидтелген қабатты қалыптастыруға арналған эксперименттер үшін метан (CH_4) жұмыс газы ретінде қолданылады. Әдеби деректерді талдау электронды сәулемен өзара әрекеттесу нәтижесінде осы газ тәрізді метан H^+ , H^{2+} , C^+ , CH^+ , CH^{2+} , CH^{3+} және CH^{4+} сияқты фрагменттерге ыдырайтынын көрсетті, бұл көмірсутектер арқылы плазмамен суланатын беттер бойымен көміртек атомдарын жергілікті тасымалдау шарттарын имитациялауға мүмкіндік береді.

Осылайша, диссертациялық жұмыстың тақырыбы негізделді және ШПР-ді қолдана отырып карбидтеу кезінде вольфрам бетінің құрылымдық-фазалық күйін зерттеуге бағытталды.

Диссертациялық жұмыстың мақсаты – шоқтық-плазмалық разрядта карбидтеу нәтижесінде вольфрамның құрылымдық-фазалық күйінің негізгі өзгеру заңдылықтарын белгілеу.

Қойылған мақсатқа қол жеткізу үшін келесі **міндеттерді** шешу қажет:

1. ШПР-та вольфрамды карбидтеу әдісін әзірлеу және оны плазмалық-шоқтық қондырғыда (ПШҚ) іске асыру шарттарын белгілеу;

2. ШПР-та вольфрамды карбидтеудің температуралық-уақыттық параметрлерін анықтау;

3. ШПР-та карбидтеу нәтижесінде вольфрам бетінің құрылымдық-фазалық күйінің негізгі өзгеру заңдылықтарын белгілеу.

Зерттеу нысаны метан ортасында ПШҚ-да карбидтелген ВЧ маркалы вольфрам (қоспаларсыз таза вольфрам).

Зерттеу пәні WC, W₂C негізіндегі аралас бетүсті қабаттың қалыптасу ерекшеліктері және ШПР-та карбидтелген вольфрамның құрылымдық-фазалық күйі.

Зерттеу әдісі. Диссертациялық жұмыста ШПР-та вольфрамды карбидтеу бойынша эксперименттік жұмыстарды іске асыру үшін плазмалық-шоқтық қондырғысы қолданылды. ШПР-та карбидтелген вольфрам бетінің құрылымдық-фазалық күйін зерделеу үшін эксперименттік зерттеулердің келесі әдістері қолданылды: Crystallography Open Database деректер базасын және PDF-2 ICDD Release 2004 деректер базасын қолдану арқылы рентген құрылымдық талдау, сканерлейтін электрондық және жарық өткізгіш электронды микроскопия. Плазманы талдауға арналған диагностикалық жинақ ретінде зондтық диагностика, оптикалық спектрометрия, газ құрамының масс-спектрометриясы әдістері қолданылды.

Жұмыстың ғылыми жаңашылдығы мұнда алғаш рет

– ШПР-та вольфрамды карбидтеу әдісі әзірленді және оны ПШҚ-да іске асыру шарттары белгіленді;

– ШПР-та карбидтеу процессінің ерекшеліктері зерделенді және ШПР-де вольфрамды карбидтеудің температуралық-уақыттық параметрлері анықталды;

– вольфрамның беткі қабаттарындағы құрылымдық-фазалық өзгерістер сипатталды және оларды ШПР-та ПШҚ-да карбидтеу кезінде анықталған негізгі заңдылықтары белгіленді.

Қорғауға шығарылатын негізгі ережелер:

– **ПШҚ-да шоқтық-плазмалық разрядта вольфрам бетін карбидтеудің әзірленген әдісі.** Шоқтық-плазмалық разрядта вольфрам бетін карбидтеу жұмыс газының қысымы $\sim(1-1,05) \cdot 10^{-1}$ Па кезінде және 600 с-тан 3600 с-қа дейінгі сәулелену ұзақтығымен үлгінің беткі температурасы 1000 °C-тан 1700 °C-қа дейін болған кезде бетүсті аймағында көміртектің жинақталуы және диффузиясы арқылы метан ортасында 0,5 кэВ вольфрам үлгісіне теріс потенциал берілген кезде жүзеге асырылады.

– **ШПР-та вольфрамды карбидтеудің негізгі температуралық-уақыттық тәуелділіктері.** 700 °C-тан 1200 °C-қа дейінгі температурада ШПР-та вольфрам бетін карбидтеу эксперименттері тұтас пленка түрінде көміртекті жабынның пайда болуына әкеледі. WC-нің түзілуі 1100 °C-тық температура кезіндегі эксперименттерден кейін тіркелді. 1100 °C-тан 1400 °C-қа дейінгі диапазонда вольфрам беті температурасының өзгеруі WC және W₂C карбидті фазаларының бір мезгілде түзілуіне әкеледі. 1500 °C - 1700 °C-та сәулелендіргеннен кейін үлгілер бетінің фазалық құрамының негізі W₂C болады. 1300 °C-тық температурада карбидтелген қабаттың фазалық құрамы карбидтеу ұзақтығына байланысты. 1700 °C-тық температурада вольфрамның бетүсті аймағында W₂C түзілуі карбидтеу ұзақтығына қарамастан аяқталады. Алдын ала

күйдірілген үлгілерді карбидтеуден кейін WC фазасы құрамының айтарлықтай жоғарылауы және бастапқы вольфрамға қатысты W₂C фазасы құрамының төмендеуі байқалады.

– ШПР-та карбидтеу кезінде вольфрамның беткі қабаттарындағы құрылымдық-фазалық түрленулер. 1000 °С-тық температурада үлгінің фазалық құрамында металл W-ның текше фазасынан басқа, гексагоналды тығыз оралған құрылымның WC фазасы көрінеді. 1400 °С-тық және одан жоғары температурада металл W-ның фазасы фазалық құрамнан жоғалады, бұл W-ның үш түрлі жолмен жүретін карбидті фазалардың түзілуіне толығымен жұмсалғанын көрсетеді: $W \rightarrow W_2C \rightarrow WC$, $W \rightarrow WC \rightarrow W_2C$, $W \rightarrow W_2C, WC$.

Практикалық мәні

ШПР-ді қолдану арқылы беттік карбидтеу процессін эксперименттік зерттеудің нәтижелері КТМ токамагын пайдалану кезінде зерттелетін үлгілерде вольфрам карбидтерінің қалыптасуы үшін жағдайларды болжауға мүмкіндік береді, сондай-ақ КТМ токамагындағы ТЯР кандидаттық материалдары үлгілерінің бетімен плазманың өзара әрекеттесуін зерттеу бағдарламаларын қалыптастыруда практикалық қолданысқа ие болады. ҚР ҰЯО АЭИ филиалында плазманың материалдар бетімен өзара әрекеттесуі саласында ғылыми және қолданбалы зерттеулер жүргізу рәсіміне диссертациялық жұмыстың нәтижелерін енгізу туралы акті алынды. Эксперименттік зерттеулердің нәтижелері ҚР ҰЯО «КТМ Қазақстандық материалтану Токамагындағы эксперименттік зерттеулерді ғылыми-техникалық қамтамасыз ету» ғылыми еңбектер жинағына енді. Э.Ф. Батырбековтің, М.К. Скаковтың жалпы редакциялығымен ISBN 978-601-06-7964-1 2021-172 б: ил.168. Курчатова, ҚР Энергетика министрлігінің «ҚР Ұлттық ядролық орталығы» РМК «Атом энергиясы институты» филиалы.

Автордың жеке үлесі

Диссертациялық зерттеудің мақсаты мен міндеттерін қою, алынған нәтижелерді талқылау және негізгі қорытындыларды тұжырымдау ғылыми кеңесшілермен бірлесіп жүргізілді. Автордың жеке үлесі әдеби деректерге аналитикалық шолу және патенттік ізденіс жүргізу, ШПР-ті қолдана отырып карбидтеу әдісін әзірлеуге және іске асыруға қатысу, эксперименттік жұмыстарды дайындау және жүргізу, алынған эксперименттік деректерді талдау және өңдеу, есептеу жұмыстарын жүргізу, ШПР-ті қолдана отырып, вольфрамды карбидтеу кезінде бетүсті аймақтары құрамының өзгеру заңдылықтарын, беттің морфологиясы мен құрамының эволюциясын зерттеу, сондай-ақ диссертация тақырыбы бойынша негізгі жарияланымдарды дайындау. Барлық эксперименттік жұмыстар ҚР ҰЯО РМК АЭИ филиалының материалтану сынақтары бөлімінің зертханаларында мамандармен тығыз ынтымақтастықта жүргізілді.

Диссертациялық жұмыс тақырыбының ғылыми-зерттеу бағдарламаларының жоспарларымен байланысы.

Осы жұмыстың едәуір бөлігі 16.11.2020 ж. №281 Шарттың шеңберінде 2020-2021 жылдарға арналған «Плазмалық сәулелену кезінде вольфрам бетінде карбидтелген қабаттың қалыптасуын зерттеу» (AP08955992) тақырыбы

бойынша «Қазақстан Республикасы Білім және ғылым министрлігінің Ғылым комитеті» мемлекеттік мекемесінің қаржылық қолдауымен орындалды, сондай-ақ жұмыстың бір бөлігі «КТМ қазақстандық материалтану токамагындағы эксперименттік зерттеулерді ғылыми-техникалық қамтамасыз ету» (BR09158585) ғылыми-техникалық бағдарламаның шеңберінде 02.01.01 «Вольфрамды беттік карбидтеудің физикалық процестерін зерделеу» тақырыбы бойынша орындалды.

Жұмыста алынған нәтижелердің негізділігі мен дұрыстығының дәрежесі қойылған міндеттердің дұрыстығымен, дәлдігімен және бірегейлігімен, электронды микроскопияның, масс-спектроскопияның, рентгенқұрылымдық талдаудың өзара сәйкес нәтижелерімен қамтамасыз етіледі. Диссертацияның негізгі нәтижелері ҚР ҒЖБМ Ғылым және жоғары білім саласындағы сапаны қамтамасыз ету комитеті ұсынған басылымдарда, сондай-ақ Scopus және Web of Science дерекқорына кіретін рецензияланатын шетелдік ғылыми журналдарда жарияланды.

Жұмыс нәтижелерін апробациялау. Диссертацияның негізгі нәтижелері он бір халықаралық конференцияда баяндалды және талқыланды:

1. 14th International Conference «Gas Discharge Plasmas and Their Applications» GDP, (Tomsk, Russia, September 15-21, 2019);

2. XXIV Плазманың бетпен өзара әрекеттесу конференциясы (Мәскеу қ., Ресей, 2021 жылғы 4-5 ақпан);

3. International online conference «Advanced manufacturing materials and research: new technologies and techniques AMM&R2021» (Ust-kamenogorsk, Kazakhstan, 2021, February 19);

4. 15th International Conference «Gas Discharge Plasmas and Their Applications»; GDP, (Tomsk, Russia, September 5-10, 2021);

5. IX халықаралық конференция «Семей сынақ полигоны: мұра және ғылыми-техникалық әлеуеттің даму келешегі» (Курчатов қ., Қазақстан, 2021 жылғы 07-09 қыркүйек);

6. Қазақстан Республикасы Тәуелсіздігінің 30 жылдығына арналған III халықаралық ғылыми форум «Ядролық ғылым және технологиялар», (Алматы қ., Қазақстан, 2021 жылғы 20-24 қыркүйек);

7. 10th International Conference on Nanomaterials and advanced energy storage systems (INESS-2022), (Astana, August 4-6, 2022);

8. Халықаралық ғылыми-практикалық конференция «Уәлиев оқулары-2022», (Өскемен қ., Қазақстан, 2022 жылғы 16-17 қыркүйек)

9. 32nd Symposium on Fusion Technology (SOFT2022), (Dubrovnik, Croatia, 18th – 23rd September 2022).

10. International Conference “ABDILDIN READINGS”, (Almaty, Kazakhstan, April 12 - 15, 2023)

11. XXIV Иондардың бетпен өзара әрекеттесу конференциясы (Ярославль қ., Ресей, 2023 жылғы 21-24 тамыз);

12. X халықаралық конференция «Семей сынақ полигоны: мұра және ғылыми-техникалық әлеуеттің даму келешегі» (Курчатов қ., Қазақстан, 2023 жылғы 12-14 қыркүйек).

Сондай-ақ үш конференция-конкурста:

1. ҚР ҰЯО РМК жас ғалымдары мен мамандарының ҒЗТКЖ ХІХ конференция-конкурсы, ҚР Ұлттық ядролық орталығы (Курчатов қ., Қазақстан, 2020 жылғы 29 қыркүйек – 1 қазан);

2. ҚР ҰЯО РМК жас ғалымдары мен мамандарының ҒЗТКЖ ХХ конференция-конкурсы, ҚР ҰЯО «Атом энергиясы институты» филиалы (Курчатов қ., Қазақстан, 2021 жылғы 6–8 қазан);

3. ҚР ҰЯО РМК жас ғалымдары мен мамандарының ҒЗТКЖ ХХІ конференция-конкурсы, ҚР ҰЯО «Атом энергиясы институты» филиалы (Курчатов қ., Қазақстан, 2022 жылғы 12–14 қазан).

Сонымен қатар, диссертациялық жұмыстың негізгі нәтижелері «С.Аманжолов атындағы ШҚУ» КЕАҚ-тың физика кафедрасының ғылыми семинарларында, жаратылыстану ғылымдары және технологиялар факультетінің бірлескен ғылыми семинарларында және ғылыми-техникалық кеңесінде, сондай-ақ ҚР ҰЯО РМК және ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалының ғылыми-техникалық кеңестерінде баяндалды және талқыланды.

Жарияланымдары. Диссертациялық жұмыстың негізгі нәтижелері 18 баспа жұмысында жарияланды, оның ішінде Scopus және Web of Science дерекқорында индекстелетін журналдарда 3 мақала, ҚР ҒЖБМ Ғылым және жоғары білім саласындағы сапаны қамтамасыз ету комитеті ұсынған рецензияланатын ғылыми басылымдарда 3 мақала.

Диссертацияның құрылымы мен көлемі. Диссертациялық жұмыс кіріспеден, төрт бөлімнен, қорытынды мен пайдаланылған дереккөздер тізімінен тұрады. Жұмыс 108 бетте жазылған, 60 суреттен, 9 кестеден және 168 атаудан тұратын пайдаланылған дереккөздердің тізімінен тұрады.