

Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті

ӘОЖ 539.2:[539.12.04+533.9

Қолжазба құқығында

**АЛДАБЕРГЕНОВА ТАМАРА МУСТАФАЕВНА**

**Плазма және зарядталған бөлшектер ағындары арқылы  
сәулелендірудің әсерінен графит пен вольфрам бетінің  
құрылымы мен физика-механикалық қасиеттерінің  
деградацияға ұшырауын зерттеу**

6D071000 - Материалтану және жаңа материалдар технологиясы

Философия докторы (PhD)  
дәрежесін алу үшін дайындалған диссертация

Ғылыми жетекшілер:  
ф.-м.ғ.к., Кислицин С.Б.  
Ядролық Физика Институты, Қазақстан

Техника ғылымдарының докторы,  
профессор  
Wojciech Wieleba, Польша

Қазақстан Республикасы  
Алматы, 2019

## МАЗМҰНЫ

|                                                                                                                                                          |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>НОРМАТИВТІК СІЛТЕМЕЛЕР</b>                                                                                                                            | 4  |
| <b>АНЫҚТАМАЛАР</b>                                                                                                                                       | 5  |
| <b>БЕЛГІЛЕУЛЕР ЖӘНЕ ҚЫСҚАРТУЛАР</b>                                                                                                                      | 6  |
| <b>КІРІСПЕ</b>                                                                                                                                           | 7  |
| <b>1 ӘДЕБИЕТТЕРГЕ ШОЛУ</b>                                                                                                                               |    |
| <b>ПЛАЗМАҒА АЙНАЛҒАН ТЕРМОЯДРОЛЫҚ ҚОНДЫРҒЫЛАР МАТЕРИАЛДАРЫ</b>                                                                                           | 16 |
| 1.1 ТЯР плазмаға айналған элементтердің міндеттері.....                                                                                                  | 16 |
| 1.2 Плазмаға айналған элементтерге түсетін бөлшектер мен энергиялар ағындары                                                                             | 22 |
| 1.3 ПАЭ материалдарын тандауды анықтайтын факторлар                                                                                                      | 24 |
| 1.3.1 Эрозия және материал атомдарының ұстап тұру аумағына түскен кездегі реактордың параметрлеріне әсері                                                | 24 |
| 1.3.2 Иондық сәулелендіру кезіндегі физикалық тозаңдату                                                                                                  | 26 |
| 1.3.3 Жергілікті балқыту мен буландыру кезіндегі жылулық эрозия                                                                                          | 29 |
| 1.3.4 Сутегімен және гелий иондарымен сәулелендірудің плазмаға айналдырылған материалдардың құрылымы мен қасиеттеріне әсері.                             | 34 |
| 1.4 Қорытындылар және зерттеу міндеттерін қою                                                                                                            | 37 |
| <b>2 ЗЕРТТЕУ ӘДІСТЕРІ ЖӘНЕ ЭКСПЕРИМЕНТТІК ҚҰРЫЛҒЫЛАРМЕН МАТЕРИАЛДАР</b>                                                                                  | 39 |
| 2.1 Құрылымы мен қасиеттерін зерттеу әдістері                                                                                                            | 39 |
| 2.2 Иондар сәулелерімен, импульстік электрондармен және плазмамен сәулелендіруге арналған жабдықтар және әдістер                                         | 44 |
| 2.3 Зерттеуге арналған үлгілер                                                                                                                           | 47 |
| 2.4 Жылу эрозиясынның әсерін зерделеп үлгіні зерттеуге дайындау, гилидің жинақталуы және блистерлердің пайда болуы                                       | 48 |
| <b>3 ВОЛЬФРАМЫНЫҢ ҚҰРЫЛЫМЫ МЕН ФИЗИКА-МЕХАНИКАЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІНЕ ПЛАЗМА ЖӘНЕ ЗАРЯДТАЛҒАН БӨЛШЕКТЕР АҒЫНДАРЫМЕН СӘУЛЕЛЕНДІРУДІҢ ЫҚПАЛЫН КЕШЕНДІ ЗЕРТТЕУ</b> | 54 |
| 3.1 Иондардың әсерімен тазалығы жоғары вольфрамның тозаңдалу эффектілерін зерттеу                                                                        | 54 |
| 3.2 Импульстік сәулелендіру кезінде вольфрамның эрозиясы мен физика-механикалық қасиеттерінің өзгеруі                                                    | 61 |
| 3.3 Қалдық газ плазмасының иондармен сәулелендірілген жоғары таза вольфрам бетінің құрылымы мен қасиеттерін зерттеу                                      | 71 |
| 3.4 Альфа-бөлшектермен сәулелендірілген вольфрамдағы газтекес қосындылардың жинақталуы және беттің деградациясы (блистеринг, флекаинг)                   | 77 |

|     |                                                                                      |     |
|-----|--------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.5 | Протонды сәулелендірудің жоғары таза вольфрамның құрылымы мен қасиеттеріне әсері     | 87  |
| 3.6 | Иондық сәулелендіру кезінде графитті тозаңдату коэффициентін экспериментті өлшеу     | 91  |
| 3.7 | Плазма ағындарымен импульстік сәулелендірілген графит бетінің эрозиясы және құрылымы | 93  |
|     | <b>ҚОРЫТЫНДЫ</b>                                                                     | 100 |
|     | <b>ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ</b>                                               | 103 |

## **НОРМАТИВТІК СІЛТЕМЕЛЕР**

Бұл диссертациялық жұмыста төмендегідей нормативтік құжаттарға сілтемелер көрсетілген:

ҚР МЖМБС 5.04.034-2011: Қазақстан Республикасының Мемлекеттік жалпыға міндетті білім стандарты. Жоғары оқу орнынан кейінгі білім беру. Докторантура. Негізгі ережелер (№ 1080, 23 тамыз 2012 жылғы өзгерістер мен толықтырулар);

№ 127 31 наурыз 2011 жылғы ғылыми дәрежесін тағайындау ережесі;

Мемлекетаралық стандарттар: МЕМСТ 7.32-2001 (2006 жылы өзгертілген);

МЕМСТ 7.1-2003. Библиографиялық жазба. Библиографиялық сипаттамалар. Жалпы талаптар мен ережелер.

## АНЫҚТАМАЛАР

Бұл диссертациялық жұмыста келесі терминдерге сәйкес анықтамалар қолданылған:

**Термоядролық реактор** - өте жоғары температураларда өтетін жеңіл атом ядроларының синтез реакциясы есебінен энергия алу үшін жасалған қондырғы

**Бірінші қабырғасы** – дивертор және лимитер

**Alcator C-Mod** - Массачусетск технологиялық институтындағы Термоядролық реактор және физика плазма орталығындағы зерттеуші токамак

**LHD-Large Helical Device** - Жоғарғы өткізгішті стелларатор, Япония

**Нысана** - сәулелендірілетін материал

**Ядролық реакция** - атом ядроларының бір-бірімен немесе элементар бөлшектермен әсерлесуі нәтижесінде басқа ядроларға айналуы

**Протон** - сутегі атомының ядросы

**Альфа бөлшектер** – Иондаушы сәулелендіру көздері

**Blistering** - беттің көпіршіктенуі, Газ толтырылған кеуектердің пайда болғанын білдіреді

**Иондар үдеткіші** - берілген шамалар шегіне дейін иондар энергиясын арттыруға арналған ядролық қондырғы

**Флекинг** - қабыршықтануы. Беткі қабаттың жарылуын айтады

**DFW маркалы вольфрам және графит**– зерделеуге арналған үлгілер

## БЕЛГІЛЕУЛЕР МЕН ҚЫСҚАРТУЛАР

|                                |                                                                                                          |
|--------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ЯФИ                            | - Ядролық физика институты                                                                               |
| КСРО                           | - Кеңестік Социалистік Республикалар Одағы                                                               |
| АҚШ                            | - Америка Құрама Штаттары                                                                                |
| ҚТМ                            | - Қазақстандағы термоядролық материалтану реакторы                                                       |
| ҰЯО                            | - Ұлттық Ядролық орталық                                                                                 |
| ЖЭМ                            | - жарық өткізгішті электронды микроскоп                                                                  |
| РКШ                            | - Резерфордтық кері шашырау                                                                              |
| РЭМ                            | - растырлық электронды микроскоп                                                                         |
| ТЯР                            | - термоядролық реактор                                                                                   |
| УКП-2-1                        | - қайта зарядтайтын үдеткіш кешені                                                                       |
| ДЦ-60                          | - ауыр иондар үдеткіші                                                                                   |
| КЦК                            | - көлемді центрленген кубы                                                                               |
| ХЭТР(ITER)                     | - Халықаралық эксперименталды термоядролық реактор                                                       |
| ПАЭ                            | - плазмамен айналған элемент                                                                             |
| ТНК                            | - Термоядролық нейтрондар көзі                                                                           |
| ҚР                             | - Қазақстан Республикасы                                                                                 |
| СЭМ                            | - сканерлі электронды микроскопы                                                                         |
| АҚМ                            | - атомдық куштік микроскопы                                                                              |
| TFTR                           | - Tokamak Fusion Test Reactor, Принстон Университеті (АҚШ)<br>зерттеу Токамак плазма физикасы зертханасы |
| VDE                            | - плазмалық баудың тігінен жылдам жылжуы                                                                 |
| ELM                            | - шеткі жерлерде локализацияланған тұрақсыздықпен жоғары<br>қуаттың шығарындылары.                       |
| JET                            | - Joint European Torus, Біріккен Европалық Токамак.                                                      |
| ТНК                            | - термоядролық нейтронды көздер.                                                                         |
| КСПУ-Т,<br>КСПУ-Be,<br>КСПУ-50 | - импульстік плазмалық жылу жүктемесін моделдеу үшін<br>қондырғылар, Ресей                               |
| JUDITH-2,<br>IDTF,FE200        | - электронды пучка арқылы жылу жүктемесін моделдеу үшін<br>қондырғылар                                   |
| JEBIS                          |                                                                                                          |
| ЭДРЕ                           | - энергия дисперсті рентгендік микроталдау құрылғысы                                                     |
| ОНАУС                          | - электронды таразы                                                                                      |

## **КІРІСПЕ**

### **Жұмыстың жалпы сипаттамасы**

Бұл диссертациялық жұмыста жоғары сұрыпты екі рет қыздырылып штампталған вольфраммен реактор графитінің беттік құрылымы мен физика-механикалық қасиеттеріне импульс кезінде бөлінген энергиямен иондық сәулелену әсерінің эксперименттік және теориялық зерттеу кезінде алынған нәтижелері көрсетілген.

### **Жұмыстың өзектілігі**

Әлемдік қоғамдастықтың энергетикалық мәселелерін шешудің перспективалық жолдарының бірі – басқарылатын термоядролық реакцияны жүзеге асыру болып табылады. Зерттеу термоядролық қондырғылардың арасында токамак түріндегі қондырғыларда плазманың ең жақсы параметрлері алынған. Сондықтан қазіргі уақытта ядролық физиктердің және материалтанушылардың негізгі күш-жігерлері осы қондырғыларды одан әрі дамытуға және жетілдіруге шоғырландырылған. Қазіргі уақытта жобаланатын токамак түріндегі ең ірі қондырғылар – халықаралық термоядролық эксперименттік реактордың (ХЭТР, ITER) энергетикалық термоядролық реакторға ұқсас параметрлері болады. Термоядролық реакторлардың (ТЯР) материалтану мәселелері 40 жылдан аса бұрын КСРО, АҚШ және Еуропаның бірқатар зерттеу орталықтарында ірі ауқымды ТЯР қарқынды тұжырымдамалық пысықтау басталған кезде күн тәртібіне нақты қойылды [1-4].

ТЯР құрудың материалтану мәселелерінің арасында, оларға бірінші қабырғаның салқындатып ұстап тұруы және плазмалық бауларды асқын өткізгіштік магниттермен ұстап қалу жүйелері және т.б. мәселелер жатады, ТЯР ең энергия кернеулі түйіндерінің бірі ретінде диверторлы құрылғылардың материалдарын жасау және бірінші қабырғаны энергия ағынынан және зарядталған бөлшектерден қорғау мәселелері кем емес рөл атқарады. ТЯР үшін конструкциялық материалдарды жасау, таңдау мәселелері кез келген ядролық қондырғылар үшін материалдардың радиациялық бекемділік мәселелерінің құрамдас бөлігі болып табылады, бірақ сонымен қатар өз ерекшеліктері де бар. Сонымен, ТЯР материалдар нейтрондық сәулелендірудің және жылу тасымалдағышпен түйісудің әсеріне ғана емес, сонымен қатар радиациялық әсерлерді айтарлықтай күшейтетін нейтрондық және иондық сәулелендірудің синергиялық әсеріне де, сондай-ақ, плазма үзілген кезде камера бетіне энергияның бөлінуіне де ұшырайды. Плазманың тороидалды ұстаумен ТЯР іске асырылатын шешімдердің бірі камераны қаптау, яғни ТЯР бірінші қабырғасын өзіне негізгі термиялық жүктемелерді қабылдайтын және бірінші қабырғаны осы әсерлерден сақтайтын арнайы қорғау материалдары болып табылады. Энергия және бөлшектер ағындарын басқаруға жататын ХЭТР физикасы міндеттерінің бірі қалыпты жұмыс кезінде, өтпелі оқиғалар кезінде де материалдардың эрозиясын азайту, сондай-ақ осы материалдарды сәйкесінше таңдау болып табылады [5]. Токамактардың әзірленетін конструкцияларының көпшілігінде термоядролық реактордың бүкіл қызмет ету мерзімі ішінде жұмыс

істейтін бірінші қабырға конструкциясының тұжырымдамасы дамыған. Оның жұмыс істеген уақытында ол плазмадан шыққан бөлшектердің және жылудың қуатты ағындарының әсерін, плазмадағы термоядролық реакцияның жануы кезінде бөлшектер мен сәулеленудің әсерін сынайтын және плазма энергиясының негізгі бөлігін оның үзілуі кезінде қабылдайтын болады. Бұл ретте шешуші рөл бірінші қабырғаны қорғау материалдарына беріледі, олар бірінші қабырғаның жұмыс қабілетін қамтамасыз етуі және ТЯР бүкіл «өмір кезеңі» ішінде жұмыс істеуі тиіс.

Аса қатаң талаптар диверторлы пластиналарға қойылады. Дивертор пластиналарына негізгі жылу және радиациялық жүктемелер келеді, өйткені олардың міндеті плазманы термоядролық реакция өнімдерінен «тазарту» болып табылады. Сондықтан дивертор пластиналарына плазманың үзілуі түріндегі оқыс жағдайларда энергия ағындары ғана емес, токамактың штаттық жұмысы кезінде зарядталған және бейтарап бөлшектердің энергия ағындары әсер етеді. Бүгінгі күні дивертор пластиналары үшін материалды таңдау міндеті әсіресе өткір болып табылады. Диверторды дайындауға арналған материалдар ретінде – молибден, графит, сұйық кристалды материалдар сияқты бірқатар материалдар қарастырылды, бірақ қазіргі уақытта ең басым вольфрам болып саналады [6], бұған қоса ерекше технология бойынша жасалған жоғары білікті вольфрам.

Қазіргі уақытта бірінші қабырғаны қорғау және диверторлы құрылғылар материалдарына бірқатар талаптар қалыптасқан. Негізгі талаптары:

- шағын атом нөмірі,
- бетті тозандатудың төмен коэффициенті,
- жылу өткізгіштіктің жоғары коэффициенті,
- төмен химиялық активтілігі,
- балқудың жоғары температурасы,
- жоғары температураларда жоғары беріктік,
- жоғары пластикалылық және сызатқы беріктік,
- эрозия процестеріне қатысты жоғары беттік радиациялық төзімділік (тозандату және қабыршақтану).

Қазіргі уақытта токамак түріндегі ТЯР үшін көміртегі, бериллий және вольфрам негізіндегі материалдар ең перспективті болып табылады. Вольфрам балқудың жоғары температурасы мен жылу өткізгіштік, бетті тозандатудың төмен коэффициенті және басқа сипаттамалар сияқты осындай қасиеттерінің арқасында ТЯР дивертор пластиналарының перспективті материалы ретінде қарастырады. Вольфрам маркалары дайындау тәсілімен, қоспалардың және лигерлеуіш қосымшалардың болуымен ерекшеленеді, соның салдарынан әртүрлі физика-механикалық қасиеттері бар. Атап айтқанда, вакуумдық қорытудың аса таза вольфрамы қажетті талаптарға жауап береді және ХТЭР реакторы диверторын қаптау материалы ретінде қарастырылады. Осы талаптарға сүйене отырып, диссертациялық жұмыста ТЯР диверторының аса перспективалық материалы ретінде таза вольфрамның зерттеулеріне баса назар аударылған. ТЯР пайдалану факторларының бірінші қабырғаны қорғау және



дивертор материалдарының қасиеттеріне әсері диссертацияның бірінші тарауында баяндалған, онда жалпы қабылданған атауы – плазмаға айналған материалдарға қойылатын негізгі талаптар қарастырылды.

### **Диссертациялық жұмыстың мақсаты**

Плазманы тороидты формада ұстауға негізделген термоядролық реакторлардың ішкі бетінің қабырғасы мен дивертор пластиналарын қорғауға қолдану үшін үлкен үміт күттіріп отырған DFW маркалы аса таза вольфрамның құрылымы мен физика-механикалық қасиеттеріне импульсті ағын энергиясы мен иондық сәулелену әсерін эксперименттік зерттеу. Бұл мақсатқа жету үшін келесі тапсырмалар мен міндеттер алға қойылды.

Осы мақсатқа жету үшін келесідей мәселелер шешу қажет:

1. Иондық сәулелену кезіндегі вольфрам қасиеттерінің нашарлауы мен беттік тозандану эффектілерін зерттеу әдістерін жасақтау және бейімдеу;
2. Иондық сәулелену кезіндегі DFW вольфрамы мен графиттің тозандану эффектілерін зерттеу;
3. Импульстік энергия ағыны (импульсті электронды және плазмалық ағын) әсерінен DFW вольфрамы мен графиттің беттерінің эрозиялану (беттің жергілікті балқуы кезіндегі массасының жоғалуын өлшеу) эффектісін және олардың механикалық қасиеттерінің өзгерісін зерттеу;
4. Альфа бөлшектермен және протондармен сәулеленген DFW вольфрамдағы гелий мен сутегінің жиналып қалуын және беттік құрылымның нашарлау (блистерлер-көпіршіктер және флекингтер-қабықшалар) эффектілерін зерттеу;
5. Импульстік энергия ағыны әсері кезіндегі беттің эрозия эффектісін бағалауға арналған жаңа теориялық моделдерді жасақтау.

### **Зерттеу нысаны**

- Ыстық қалыптау әдісімен (double forget high purity tungsten fabricated by firm Plansee AG), алынған DFW маркалы аса таза вольфрам токамактар диверторының пластиналарын қорғайтын перспективалық материалдарының бірі болып табылады.

- APB маркалы графит ядролық техниканың конструкциялық материалы болып табылады.

### **Зерттеу пәні болып табылады**

Төмен энергиялы альфа бөлшектермен сәулеленген вольфрамның беттік құрылымы мен механикалық қасиеттері және импульсті электрондық және плазмалық ағынмен сәулеленген кездегі вольфрам мен графит бетінің тозандануынан олардың массаларының жоғалуы.

### **Зерттеу әдістері мен тәсілдері**

Зерттеу мақсатына жету үшін келесі эксперименттік әдістер пайдаланылды:

- Оптикалық микроскопиясын – беттік морфологиясын зерттеу үшін пайдаланылды;

- Растрлық электрондық микроскопиясын – беттік «нәзік» қабатының құрылымын зерттеу үшін;

- Атомдық – күштік микроскопиясын – дайындалған үлгі бетінің бұдырлығын және құрылымын зерттеу үшін;

- Термодесорбциондық спектроскопиясын – альфа-бөлшектерімен сәулелендірілген үлгілердің имплантацияланған гелияның жиналуын анықтау үшін;

- Наноқұрылғыда және микроқұрылғыда – наноқаттылығын және микроқаттылықты өлшеу;

- Резерфордтық кері шашырау әдісімен – ионмен сәулелендірілген тозаңданған қабатының қалыңдығын өлшеу.

### **Диссертациялық зерттеу нәтижелерінің ғылыми жаңалығы**

Диссертациялық жұмыста DFW маркалы аса таза вольфраммен графиттің құрылымы мен физика-механикалық қасиеттеріне импульсті ағын энергиясының, сонымен қатар гелий мен сутегі иондарымен сәулелендіру әсерін эксперименттік жұмыста алғаш рет келесі нәтижелер алынды:

- Алғаш рет, вольфрамның тозаңдану коэффициентінің аргон иондары әсерінің флюенсінен (арнайы анықтама беру керек) тәуелділігі экспериментте өлшенді. Иондардың флюенсінің жоғарылауы кезінде тозаңдану коэффициентінің үлкейетіндігі көрсетілді;

- Алғаш рет, қуатты импульсті электрондық шокпен атқылау кезінде DFW маркалы вольфрамның массасының жоғалуы эксперименттік өлшенді. Бірдей эксперимент шарттарында вольфрамның массасының жоғалуы молибдендікінен екі есе аз болатындығы көрсетілді.

- Импульстік энергия ағыны әсері кезіндегі масса жоғалтуды бағалауға арналған теориялық модель жасақталды. Бұл модельдің ерекшелігі фазалық түрленуді (балқу және булану), сонымен қатар сәулеленген беттің жылу шығаруын есепке ала алады. Осылайша импульсті электрондық шокпен сәулеленген DFW маркалы вольфрамның, графиттің және молибденнің масса жоғалтуы теориялық түрде есептелді және эксперимент нәтижелерімен жақсы үйлесімде болатыны көрсетілді.

- Төмен энергиялы альфа бөлшектермен жоғары флюенстерге дейін сәулеленген DFW вольфрамы бетінде блистерлер мен қабыршақтар пайда болатыны экспериментте зерттелді.  $1.5 \times 10^{18} \text{ см}^{-2}$  сәулелену флюенсі кезінде бетте блистерлердің, яғни гелимен толырылған көпіршіктер бар екені, сонымен қатар олардың кейбір бөлігі жарылып кеткені, яғни беттің қабыршақтанып қалғаны көрсетілді.

- Төмен энергиялы альфа бөлшектермен сәулелену кезіндегі DFW вольфрамға гелидің десорбциялану кинетикасын зерттеуде алынған нәтижелерге сүйеніп алғаш рет гелиді табу формасы анықталды және блистерлер эволюциясымен вольфрамның беріктілік қасиеттері арасындағы байланыс анықталды.

### **Жұмыстың ғылыми және практикалық маңыздылығы**

Жұмыс барысында орындалған ғылыми зерттеулердің нәтижелері маңызды ғылыми және практикалық құндылықтарға ие:

- Жұмыс барысында алынған плазма ағынымен, импульсті энергия бөлінуімен және зарядталған бөлшектермен әсерлескен DFW вольфрамның құрылымының нашарлауымен физика-механикалық қасиеттерін кешенді зерттеудің нәтижелері негізінде DFW вольфрамды ХЭТР құрылғысымен энергетикалық ТЯР-дың дивертор материалы ретінде қолдануға болатыны ұсынылды.

- Плазма ағынымен және зарядтарған бөлшектермен әсерлесу кезінде материалдардың қасиеттерінің нашарлау деңгейі мен массаларын жоғалтуды есептеуге арналып жасақталған жаңа теориялық модель реакторлардың ішкі беткі қабырғасын қорғауға және диверторлық құрылғыларды дайындауға қолдануға ұсынылатын материалдарды тез сұрыптауға және таңдауға мүмкіндік береді. Бұл теориялық модельді сонымен қатар материалдардың эксплуатациялық қасиеттерін жақсарту үшін импульсті энергия ағынымен өңдеу кезінде олардың беткі қасиеттерін алдын-ала анықтауға, болжауға қолдануға болады.

- Резерфордтық кері шағылу әдісімен тозаңданған қабат қалыңдығын анықтауға негізделіп жаңадан жасақталған металдарды тозаңдандыру коэффициентін экспериментте өлшеу әдісі, көптеген металдар үшін, соның ішінде комозитті көп компонентті материалдар үшін де қолдануға жарамды.

- Жасақталған эксперименттік әдістемеліктер КТМ Қазақстандық реакторын қолдана отырып көптеген материалтанымдық есептерді тиімді шешуге биімделеді және үлесін қосады.

### **Қорғауға шығарылатын негізгі ережелер**

1. Энергиясы 100 кэВ аргон иондарының флюенсі  $5 \cdot 10^{+17} \text{ см}^{-2}$  –ден  $1 \cdot 10^{+18} \text{ см}^{-2}$  –ге дейін артқан сайын вольфрамның тозаңдалу коэффициенті 20%-ға артатыны экспериментті түрде анықталды. Екі фактор сәулелендіру флюенсімен бірге тозаңдалу коэффициентінің де артуының себебі болып табылады. Біріншісі – флюенстің артуымен үзілген байланыстардың көбеюі есебінен, атомдардың кристалл бетімен байланысу энергиясының кемуі. Екіншісі – атқылаушы иондардың жүгіру жолы аймағында радиациялық зақымдардың артуы. Радиациялық ақаулар түсуші иондардың арналану ықтималдығын төмендетіп, беттік қабатына жақын аймақтағы атом-атомдық соқтығысулардың каскадтарын шенемдеуге жағдай жасайды.

2. Энергия ағыны  $J = 4 \times 10^{11} \text{ Вт} \times \text{м}^{-2}$ , ұзақтығы  $2 \times 10^{-6} \text{ с}$  импульстік электрондық шокпен DFW вольфрамын сәулелендіру кезінде ауданы  $2 \text{ см}^2$  сәулелендіру бетінде 1.6 мг масса шығынына әкелетіні экспериментті түрде өлшенді. Масса шығынының шамасы сәулелендірілетін вольфрамның жылуөткізгіштігімен және сублимация энергиясымен анықталады, олар балқытылған аймақтан буланып шыққан атомдардың санын анықтайды. Жылулық сәулелену мен фазалық түрлендірулер, яғни сұйық фазаның түзілуі ескерілетін модификацияланған теориялық модель бойынша масса шығынын есептеу нәтижелері экспериментті түрде өлшенген масса шығынымен үйлеседі.

3. Энергиясы 45 кэВ альфа-бөлшектермен  $1.5 \cdot 10^{+18} \text{ см}^{-2}$  флюенске дейін сәулелендіру кезінде  $\sim 100 \text{ нм}$  тереңдікке дейінгі беттік қабатта гелимен

толтырылғын көпіршіктер, блистерлер және қабыршақтар пайда болуына әкеледі. Беттік қабаттағы гелимен толтырылған көпіршіктердің ~ 25-30% имплантталған гелий екені анықталды. Имплантталған гелидің басым бөлігі >1100 °C жоғары температураға дейін орнықты болатын және беттік қабат аймақтарын беріктендіретін гелий-ваканттық жерлерде орналасқан.

4. Ұзақтықтары 2 мкс және энергия тығыздықтары 10 Дж/см<sup>2</sup> графиттің саулеленудегі аумағы 2 см<sup>2</sup> болатын 13 импульсті плазмалық ағынмен әсерлескен кезде графит массасының 4 мг – ын жоғалтатындығы экспериментте анықталды. Осы параметрлер үшін зат массасын жоғалту жаңадан жасақталған теориялық модель көмегімен есептелінді және эксперимент нәтижелерімен жақсы үйлесімдікте жатқаны көрсетілді.

#### **Диссертациялық жұмыс тақырыбының ғылыми-зерттеу бағдарламаларының жоспарларымен байланысы**

Диссертациялық жұмыс Қазақстан Республикасы энергетика министрлігінің «Атом энергетикасы саласындағы технологиялық сипаттағы қолданбалы ғылыми зерттеулер» 105-ші қосалқы бағдарламасының, «Қазақстандық материалтанымдық токамактағы (ҚМТ) эксперименттік зерттеулерді ғылыми-техникалық қамтамасыздандыру» іс-шарасының 2015 – 2017 жылдардағы (Мемлекеттік тіркеу №0115РК02433 және 2018 жылдағы мемлекеттік тіркеу №0118РК01184) «ТЯР қондырғыларының ішкі беттік қабаты ретінде болашақта қолданылатын материалдарға зарядталған бөлшектермен плазманың жылулық эрозиясын, соның нәтижесінде беттік қабатта газдық қоспалардың жинақталуын және механикалық қасиеттерінің өзгеруін зерттеу» атты ғылыми жобасы аясында орындалды.

#### **Автордың жеке үлесі**

Автор, Т.М. Алдабергенова диссертациялық жұмысты орындау кезінде диссертациялық жұмыс тапсырмаларын анықтауға және қоюға, эксперименттік зерттеулерді орындауға, қолданбалы және теориялық материалтану лабораториясының қызметкерлерімен бірге эрозия моделін жасақтауға, жұмыс нәтижелерін талдауға және ғылыми мақалаларды басылымға дайындауға жеке үлес қосты.

#### **Жұмыста алынған нәтижелер мен жасалған қорытындылардың сенімділік деңгейі және түсіндірмесі**

Диссертациялық жұмыста алынған нәтижелердің сенімділік деңгейі зерттеулердің мұқият тексеріліп ұсынылған эксперименттік әдістер мен әдістемеліктерді дұрыс пайдаланылуымен және қазіргі заманғы қондырғылардың қолданылуымен сипатталады. Жаңадан жасақталған теориялық модельдің дұрыстығы, ол жерде алынған нәтижелердің әртүрлі материалдар үшін алынған эксперименттік нәтижелермен салыстырып тексеріу арқылы дәлелденді. Жұмыс қорытындыларының түсіндірмесінің дұрыстығы радиациялық материалтану және қатты дене физикасының іргелі ережелерімен және заңдарымен сәйкестігінде. Диссертациялық жұмыс нәтижелері жергілікті және халықаралық конференциялар мен семинарларда кеңінен талқыланды,

сонымен қатар жоғары дәрежелі халықаралық және БҒСБК (Білім және ғылым саласындағы бақылау комитеті) ұсынған Отандық журналдарда жарияланды.

### **Диссертациялық жұмыстың апробациясы**

Диссертациялық жұмыс тақырыбы бойынша 15 ғылыми мақала жарияланып басылып шықты, оның 8-і халықаралық конференцияларда тезис түрінде, 4-і философия докторы (PhD) ғылыми дәрежесін алу үшін БҒСБК-мен бекітілген журналдарда, екі мақала Web of Science мәліметтер базасына кіретін және бір мақала Web of Science мәліметтер базасына кіретін импакт-факторлы журналдарды жарияланды.

### **Зерттеу нәтижелері келесі халықаралық конференцияларда ұсынылған**

- «Heavy Ion Fusion» атты 21-ші Халықаралық симпозиум (Астана қ., Қазақстан, 18-22 маусым 2016 ж.),

- «Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций» атты Халықаралық ғылыми конференция (Томск, Ресей, 19-23 қыркүйек 2016 ж.)

- «Фараби Әлемі» атты студенттер мен жас ғалымдардың Халықаралық конференциясы (Алматы, Қазақстан, 9-12 сәуір 2018 ж.)

- «Фараби Әлемі» атты студенттер мен жас ғалымдардың Халықаралық конференциясы (Алматы, Қазақстан, 10-13 сәуір 2017 ж.)

- «Ядерная и радиационная физика, Ядерная наука и ее применение» атты XI-ші Халықаралық ғылыми конференциясы және VIII-ші Евразиялық конференциясы (Алматы, Қазақстан, 12-15 қыркүйек 2017 ж.)

- «Implantation and other applications of ions and electrons (ION)» атты XII-ші Халықаралық конференциясы (Казимиш Дольна, Польша, 18-21 маусым 2018 ж.)

- «Физика твердого тела, функциональные материалы и новые технологии» атты XIV-ші Халықаралық ғылыми конференциясы (Бішке, Қырғызстан, 1-5 тамыз 2018 ж.)

### **Диссертация материалдары бойынша ғылыми еңбектер тізімі**

1. Aldabergenova T., Ganeev G., Kislitsin S., Yar Mukhamedova G. Impact of pulsed plasma beam on the thermal erosion and the surface structure of graphite // Abstract 21<sup>st</sup> International «Sumposium on Heavy ion fusion». – Astana, Kazakhstan 2016. - P.56.

2. Aldabergenova T.M., Kislitsin S.B., Larionov A.C., Yar-Mukhamedova G.S. Effect of low-energy alpha particles irradiation on surface structure and physical-mechanical properties of high-purity tungsten // Тезис Международной конференции Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций. - Томск, Россия, 2016 г. - С.209.

3. Алдабергенова Т.М., Ганеев Г.З., Кислицин С.Б. Тепловая эрозия вольфрама при импульсном электронном облучении // Тезисы 11-й Международной конференции «Ядерная и радиационная физика». ИЯФМЭ РК. - Almaty, 2017. - С. 201.

4. Алдабергенова Т.М., Ганеев Г.З., Кислицин С.Б. Коэффициент распыления и структура поверхности графита, облученного ионами аргона с

энергией 100 кэВ // «ФАРАБИ ӘЛЕМІ» атты студенттер мен жас ғалымдардың Халықаралық ғылыми конференциясы. - Алматы, 2017. - С.272.

5. Алдабергенова Т.М., Ганеев Г.З., Кислицин С.Б., Wojciech Wieleba. Влияние бомбардировки ионами из плазмы остаточного газа на структуру и свойства поверхности высокочистого вольфрама // «ФАРАБИ ӘЛЕМІ» атты студенттер мен жас ғалымдардың Халықаралық ғылыми конференциясы. - Алматы, 2018. - С.185.

6. Aldabergenova T.M., Wieleba W., Kislitsin S. Influence of the proton irradiation on surface structure and physical mechanical properties tungsten // Abstract of International Conference Ion Implantation and other Applications of Ions and Electrons. - Poland, Kazimiers Dolny, 2018, - P. 73.

7. Алдабергенова Т.М., Кислицин С.Б., Ганеев Г.З., Виелеба В. Накопления гелия в вольфраме, облученном высокоэнергетическими альфа-частицами // Материалы XIV Между-народной научной кон-ференции «Физика твер-дого тела, функциональ-ные материалы и новые технологии» (ФТТ-2018), посвященная 80-летию основателя конференции профессора Кукетаева Т.А. – Бишкек-Караганда, 2018, -С. 93-96.

8. Ганеев Г.З., Алдабергенова Т.М., Кислицин С.Б. Эрозия поверхности и изменение физико-механических свойств молибдена и вольфрама под действием импульсного электронного облучения // Материалы XIV Между-народной научной кон-ференции «Физика твер-дого тела, функциональ-ные материалы и новые технологии» (ФТТ-2018), посвященная 80-летию основателя конференции профессора Кукетаева Т.А. - Бишкек-Караганда, 2018, - С. 25-28.

9. Алдабергенова Т.М., Кислицин С.Б., Коспанов Н., Слюсарев А.П. Изучение структуры облученных и необлученных сплавов на основе железа и алюминия методом рентгеноструктурного анализа // Вестник НЯЦ РК. Серия физ. –мат. – 2009. № 2 С.101-107.

10. Aldabergenova T.M., Kislitsin.S.B., Larionov.A.C., Yar-Mukhame-dova G.S. Effect of Low-Energy Alpha-Particles Irradiation on Surface Structure and Physical-Mechanical Properties of High-Purity Tungsten // AIP Conference Proceedings 1783,020003 (2016) ISBN 978-0-7354-1445-7, doi: 10.1063/1.4966296 Scops.

11. Алдабергенова Т.М., Ганеев Г.З., Кислицин С.Б., Досболаев. М.К. Влияние импульсного плазменного облучения на термическую эрозию и структуру поверхности графита // Известия НАН РК. серия физ.-мат. – 2017. № 3 – С.57-63.

12. Алдабергенова Т.М., Козырева М.С., Карпиков А.Н., Кислицин С.Б., Уралов М.К. Экспериментальное определение коэффициента распыления поверхности  $mo$ ,  $w$  и графита ионами аргона // Вестник НЯЦ РК. серия физ.-мат. – 2017. № 3 - С.17-23.

13. Алдабергенова Т.М., Кислицин С.Б. Тозаңдату коэффициенті және 100 кэВ энергиялы аргон иондарымен сәулелендірілген графит бетінің құрылымы // Физика- математика сериясы КазҰТЗУ Хабаршысы – 2018. №2, - Б. 533-540

14. Алдабергенова Т.М., Виелеба В., Кислицин С.Б. Қалдық газ плазмасы иондарымен сәулелендірілген жоғары таза вольфрам бетінің құрылымы мен қасиеттері // Физика- математика сериясы. КазҰТЗУ Хабаршысы – 2018. №4, - Б. 117-112.

15. Алдабергенова Т.М., Виелеба В., Ганеев Г.З., Кислицин С.Б. Влияние термических отжигов на структуру и свойства поверхности вольфрама, облученного низкоэнергетическими альфа-частицами до высоких флюенсов // Известия ВУЗов. Физика – 2018. Т. 61. №8– С.117-123.

#### **Диссертациялық жұмыстың құрылымы және көлемі:**

Диссертациялық жұмыс кіріспеден, үш бөлімнен, қорытындыдан және пайдаланылған әдебиеттер тізімінен тұрады. Жұмыс көлемі 109 беттік компьютерлік баспа мәтіннен тұрады, оның ішінде 65 сурет, 15 кесте және 106 пайдаланылған әдебиеттер саны бар.

Бірінші бөлімде иондаушы сәулелер мен энергия ағындарынан қорғау кезінде материалдарды таңдауды шектейтін негізгі факторларға қатысты жұмыстарға терең талдау жасалып әдеби шолу жүргізілген. Осы бөлімнің соңында диссертациялық жұмыстың негізгі тапсырмалары көрсетілген.

Екінші бөлімде диссертациялық жұмысты орындау барысында қолданылған негізгі әдістер келтірілген. Оның ішінде басты назар беттің тозаңдану коэффициентін анықтаумен материалдың қаттылығын беттен тереңдігі бойынша өлшеу әдістеріне бөлінді.

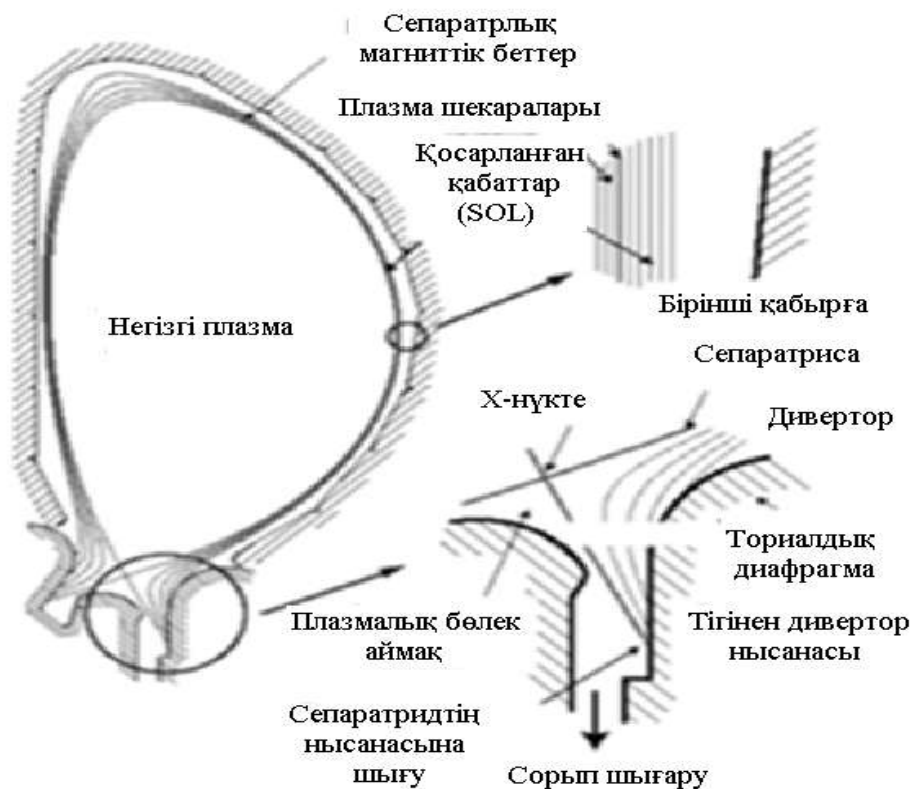
Үшінші бөлімде импульсті энергия ағындарының және зарядталған бөлшектер шоқтарының DFW вольфрам мен графиттің құрылымы мен қасиеттеріне әсерін кешенді зерттеу кезіндегі эксперименттік және есептелінген нәтижелері ұсынылған.

# 1 ӘДЕБИЕТТЕРГЕ ШОЛУ ПЛАЗМАҒА АЙНАЛҒАН ТЕРМОЯДРОЛЫҚ ҚОНДЫРҒЫЛАР МАТЕРИАЛДАРЫ

Магниттік ұстаумен термоядролық қондырғылардың көптеген әртүрлі типтерінің ішінде дәл қазір токамакпен басқарылатын термоядролық синтездің тәжірибелік іске асырылуына үміт артады. Құрылысы Франциядағы Кадарашта жүріп жатқан және 2025 жылы пайдалануға берілуге болжанған ИТЭР Халықаралық термоядролық реакторы токамак болып табылады. Токамактың құрылғысы мен жұмыс істеу қағидалары нақтылап суреттелген [7]. Осы шолуда негізгі назар плазмаға айналған токамак элементтерінің (ПАЭ) жұмыс шарттарына бөлінген. Токамактар жұмысының ерекшеліктері плазманың ПАЭ өзара әрекеттесуі көзқарасынан қозғалады. ПАЭ-нің таңдауын анықтайтын факторларды, сонымен қатар, дивертордың материалын шолу негізінде, әдеби шолуды қорытындылай келе, зерттеуге арналған материалдарды таңдау негізделеді және диссертацияның міндеттері тұжырымдалады.

## 1.1 ТЯР плазмаға айналған элементтердің міндеті

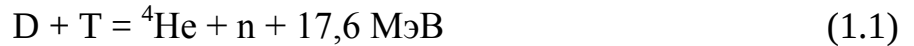
Реакторлық ауқымдағы токамактың разрядтық камерасының құрылғысын және ондағы бар элементтерді егжей-тегжейлі қарастырайық, 1.1-суретті көрстілгендей, ХЭТР Халықаралық термоядролық реакторының жаңғыртылған жобасына сәйкес келеді (1.1-сурет).



Сурет 1.1 - Токамактың плазмаға айналған негізгі элементтері



Плазмаға айналған барлық элементтер (ПАЭ) 1.2- суретте көрсетілгендей екі негізгі санатқа бөлінеді. Бұл плазманың алдын алуға тырысатын бірінші қабырғаның элементтері және лимитерлер мен диверторлар. Стационарлық (немесе квазистационарлық) реактор үшін бөлшектердің «құйылысы» болуы тиіс екені түсінікті, өйткені синтез реакциясында сутек изотоптары үздіксіз «жанады» (бірінші ТЯР үшін ең үлкен қимасы бар синтез реакциясы қолданылады):



Альфа-бөлшектер мен нейтрондардың пайда болуымен. Олардың энергиясы массаға кері пропорционал бөлінеді, сондықтан  $\alpha$ -бөлшектердің энергиясы 3,5 МэВ тең, ал нейтрондар 14,1 МэВ энергиясына ие.

Гелий иондары плазманы қыздырып, оның бөлшектеріне өз энергиясын бере отырып, және реакцияның тұтату (ignition) шарты түзілетін  $\alpha$ -бөлшектердің энергиясы есебінен реакцияны өзін-өзі қолдау болып табылады. Алайда, плазмадағы инертті гелийдің жиналуы реакцияның қуатын төмендетеді, сондықтан оны міндетті түрде реакторлық көлемнен шығару керек. Дәл осы мақсат үшін ұстау аймағынан шығып кететін плазма түсетін дивертор қызмет етеді. Тұйықталған магниттік беттер сепаратрисамен шектелген және оның ішіндегі аймақ ұстау аймағын анықтайды, ал сепаратрисадан тыс магниттік күш сызықтары ПАЭ бетімен міндетті түрде қиылысады, бұл сөзсіз плазма ағындарының материалдардың бетімен (немесе диверторға арнайы жіберілетін газбен) өзара әрекеттесуіне алып келеді.

Плазма көлемінің бірлігіндегі энергия балансы оған келіп түсетін және одан шығып кететін қуат ағындарының ара қатынасына байланысты және ең алдымен,  $\tau_E$  ұстап қалудың энергиялық уақытымен анықталады:

$$\frac{d(3nkT)}{dt} = (n^2 / 4) \langle \sigma_{TD} v \rangle E_\alpha - P_{rad} - \frac{3nkT}{\tau_E} + P_{aux} \quad (1.2)$$

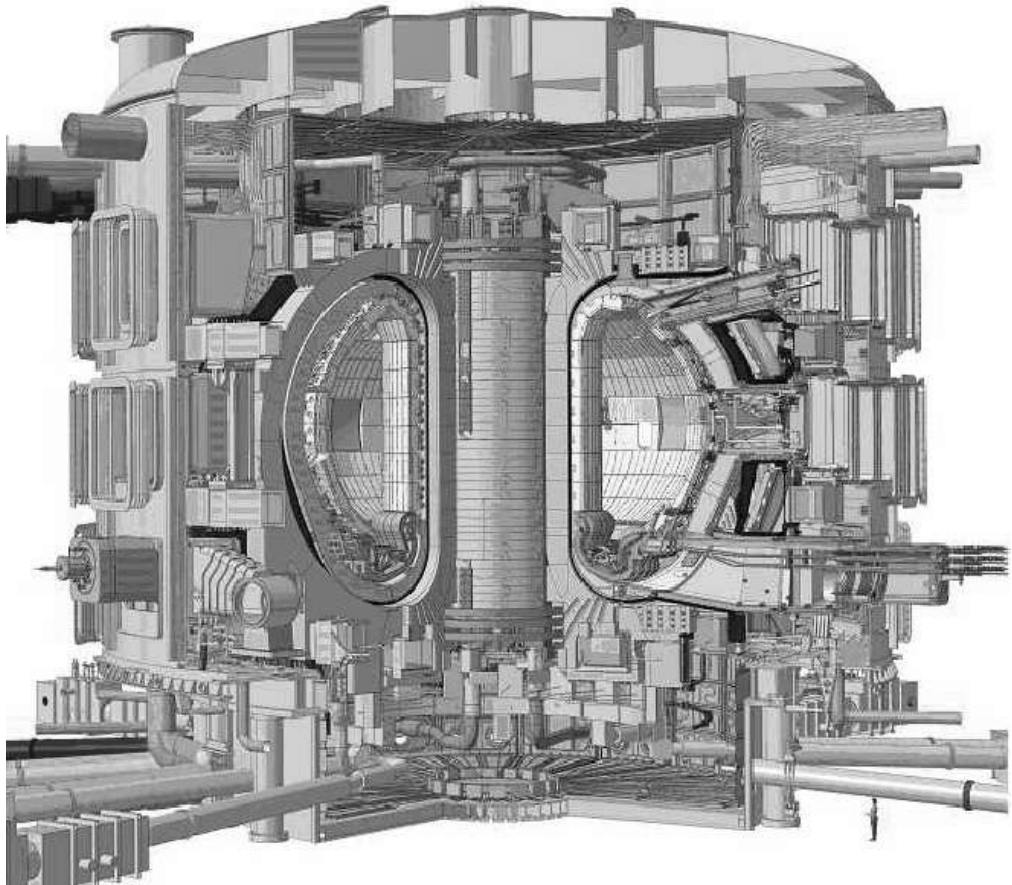
мұнда, бірінші мүшесі оң бөлігінде термоядролық реакцияларда бөлініп алынатын  $\alpha$ -бөлшектермен қыздыруға сәйкес келеді, ал соңғысы – қосымша қыздырудың барлық көздері есебінен көлем бірлігін қыздырудың қосынды қуаты, энергия шығынының негізгі арналары тежеулік сәулелену ( $P_{rad}$ ) және жылу өткізгіштік ( $3nkT/\tau_E$ ) болып табылады. Бөлшектердің балансы  $\tau_i$  плазмалық көлемде иондарды ұстап қалу уақытына байланысты:

$$\frac{dn_i}{dt} = -\frac{n_i^2}{2} \langle \sigma_{TD} v \rangle - \frac{n_i}{\tau_i} (1 - R_i) + S_f \quad (1.3)$$

және гелияның «күл» жиналуынан гелийді сақтау уақыты  $\tau_\alpha$ :

$$\frac{dn_{\alpha}}{dt} = \frac{n_i^2}{4} \langle \sigma_{TD} v \rangle - \frac{n_{\alpha}}{\tau_{\alpha}} (1 - R_{\alpha}), \quad (1.4)$$

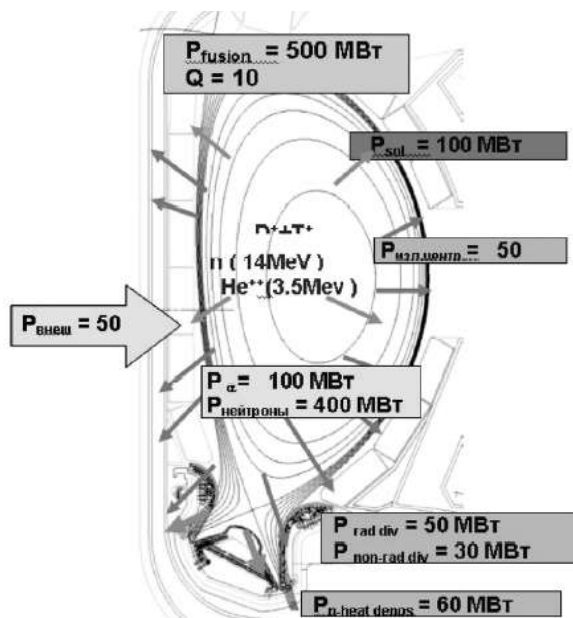
мұнда  $n_i$ ,  $n_{\alpha}$  – отын иондары және гелий концентрациялары сәйкес,  $R_i$ ,  $R_{\alpha}$  – қайту коэффициенттері сәйкес,  $S_f$  – реакцияға түсуші плазманы отынмен қоректеу жылдамдығы. Бөлшек қабырғаға қозғалуы кезінде баяулай отырып,  $\tau_c$  бөлшектерді ұстап қалу уақытына тән негізгі плазманың көлемін өзі тастап кеткенге қарағанда, өз энергиясын тез жоғалтады.  $\tau_c \approx (3-10)\tau_E$  болып саналады.



Сурет 1.2 - ИТЭР Реакторының (проектісі)

Токамак реакторы үшін плазманың квазибейтараптығын және реакция барысында оның қысымының тұрақтылығын ескере отырып, реактордың қуаты күрт төмендейтін дәрежеге дейін плазма күлмен «уланатын» уақытты анықтауға болады.  $T = 10$  кэВ кезінде  $(\sigma_{DT} v) = f_{DT} \approx 10^{-22} \text{ м}^3$  мәні үшін  $R_i = R_{\alpha} = 0$  және токамак реакторы үшін типтік  $N = 10^{20} \text{ м}^{-3}$  концентрация «күл» жойылмайтын реактордың қуаты бір минуттан сәл артық уақыт ішінде екі есе азаятынын аламыз. 1.3-суретте термоядролық реакцияның 500 МВт қуаты кезінде ИТЭР реакторынан қуаттың қандай арналар бойынша шығатыны 3-ші суретте көрсетілген. Гелиймен бір уақытта шығарылатын плазма қабатына, біріктіргіш-қабат деп аталатын, дейтерий және тритий қоспасы түрінде

жанбаған отын да түседі. Реактордағы күл концентрациясын әдетте 5-10 % аз шамамен шектейді. Демек, негізгі плазмадан біріктіргіш-қабатқа түсетін қоспаның құрамында отынның 90-95% болады, ол термалданған гелиймен бірге реакция аймағынан күш сызықтардың бойымен шығарылады және диверторға түседі.



Сурет 1.3 -  $Q = 10$  коэффициенттері күшейгендегі ИТЭР Реакторынан қуат ағымдары бөлінуі

Оның идеясы өте қарапайым. Сыртқы шарғылардың көмегімен қарама-қарсы негізгі бағытпен өріс жасау қажет. Сонда осы қосалқы шарғыға жақын кейбір нүктеде магниттік өріс нөлге дейін әлсірейді, және магниттік күш сызықтары қондырғының вакуумдық камерадан тыс кетіп «ажыратылады». Осы күш сызықтарды кейбір (диверторлы) вакуумдық көлемде шоғырландыра отырып, онда кіретін перифериялық плазма ағынын бейтараптандыруды ұйымдастыра отырып және осылайша қондырғының негізгі көлемінен плазманың сыртқы ластанған қоспаларын жоюды жүзеге асырып, қондырғыдағы қоспалардың деңгейін күрт төмендетуге болады. «С» стеллараторында диверторды қолдану плазманың ластану деңгейін 100 есеге азайтты. 1.3-суретте және 1.1-суретте көрсетілген полоидал дивертор да дәл солай жұмыс істейді. Токамактағы плазманың негізгі тоғынан полоидалды өріске қарама-қарсы бағытталған өрісті жасайтын тоғы бар шарғы (немесе шарғылар жинағы) полоидал өрістің «0» жасайды, оған 1.3 суретте көрсетілген «Х» нүктесі сәйкес келеді. «Х» нүктесі бар сепаратрисаның ішіндегі магниттік беттіктер тұйықталған, ал одан тыс ажыраталған. Дивертордың тағы бір модификациясы мүмкін -бұл «бандл» немесе нүктелік дивертор деп аталатын. Оны жүзеге асыру идеясы сипатталған тороидалды және полоидалды диверторларда сияқты дәл сондай, бірақ сыртқы катушкалар есебінен магнит өрісінің әлсіреуі плазманың барлық көлденең қимасының бойында емес

(тороидалды дивертордағыдай) немесе барлық тороидал бағыттағы көлденең қиманың бір орнында (полоидал дивертордағыдай), тек қондырғы көлемінен шығарылатын магнитті күш түтігінің бір орнында ғана болады. Мұндай дивертор DITE токамагында орнатылған болатын. Тороидалдық дивертор плазманы жақсы тазалайтыны анық, ал бандл-дивертор барлығынан нашар, өйткені магниттік күштік түтікше тордың бойымен өзімен өзі көп рет айналғанда оның аймағына тек бір рет ғана түседі. Қабырғадан түсетін қоспаларды жою үшін дивертордың тиімділігін бағалауды қарапайым ой-пікірлерден жасауға болады. Тозандатылған атомдардың (сілтілі немесе сілтілі-жерден басқа) иондану дәрежесі өте аз екені белгілі [8], сондықтан қабырғалардан плазмаға келіп түсетін (тозанданған немесе плазмадан сәулеленудің әсерінен десорбирленген) барлық ағындарды бейтарап атомдардан және/немесе молекулалардан тұратын ретінде қарастыруға болады. Бұл атомдар біріктіргіш-қабатта плазманың перифериялық қабаттың электрондарымен иондалады. Перифериядағы плазманың температурасы әдетте, төмен (оннан жүздеген эВ-ға дейін), сондықтан электрондармен иондану иондармен иондануға қарағанда әлдеқайда тиімді болып табылады. Қайта зарядтау бір сұрыпты атомдар мен иондар үшін ғана маңызды [9-10], сондықтан қабырғалар материалының атомдары үшін ол аз болады. Иондану есебінен қабырғадан плазмаға түсетін бейтарап атомдар ағынының әлсіреуі айқын өрнектермен ұсынылуы мүмкін:

$$I \approx I_0 \exp \left\{ -\frac{1}{v_0} \int_0^\Delta \langle \sigma_i^e v_e \rangle n_e dx \right\} \quad (1.5)$$

мұнда  $I_0$ -қабырғадан тозандалған атомдар ағынының тығыздығы,  $v_0$  – олардың ең ықтимал жылдамдығы,  $\Delta$  – біріктіргіш-қабаттың қалыңдығы,  $(\sigma_i^e v_e)$  –  $\sigma_i^e$  қимасы бар электрондық соққымен иондану жылдамдығы біріктіргіш-қабаттың жылдамдықтары бойынша электрондарды үлестірілудің орташаланғаны, ал интегралдау қабырға бетінен біріктіргіш-қабатқа көлденең жүреді. Егер экспоненттер дәрежесінің көрсеткіші бірліктен көп болса, онда қоспалар ағынының негізгі плазмаға түскенге дейін тиімді әлсіреуі орын алады. Бұл жағдайда тиімді диверторлы қабат туралы айтады.

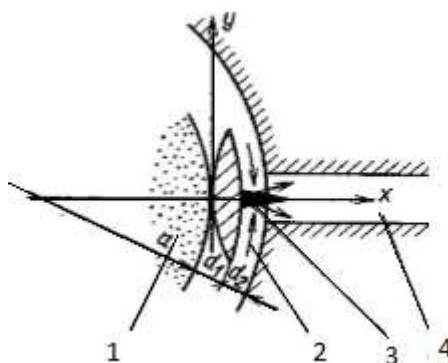
Бірінші токамактарда плазманың бірінші қабырғамен өзара әрекеттесуін шектеу функциясын разрядтау камераға қарағанда аз қималы тесігі бар баяу балқитын материалдардан (вольфрам, содан кейін графит) дайындалған диафрагма орындаған. Заманауи токамактарда мұндай шектеуші элементтерді лимитерлер деп атайды. Олар өте кең таралған және диверторлары бар токамактарда да болады 1.4-суретте бейнеленгендей, ал кейде SOL энергиясын алу функциясына сору функциясы қосылған болса, дивертордың рөлін орындайды. Мұндай лимитерлер сорушылар деп аталады. Әдеттегі мысал ретінде, ToreSupra тороидалдық өрістің аса өткізгіш орамдары бар токамактағы полоидалды сорушы лимитер, сондай-ақ плазманың ПАЭ өзара әрекеттесуін

зерттеуге арнайы арналған TEXTOR токамагындағы ALT-2 лимитері қызмет етеді.



Сурет 1.4 - JET токамагындағы плазмалық элементтеріне айналу конфигурациясы

Сорушы лимитердің жұмыс істеу қағидасы 1.5-суретте көрсетілген. Плазмаға айналған бетті ондағы энергия шығару тығыздығы тұрақты болатындай етіп есептейді. Біріктіргіш-қабатта концентрация мен температураның төмендеу көрсеткіштерін біле отырып, оның  $\Gamma = n \cdot v_{||} \propto n \cdot T^{1/2}$  тығыздығы кезінде бөлшектердің түсетін ағынының қандай үлесі ұқсас лимитерді жоятынын анықтау оңай.  $\Gamma = n \cdot v_{||} \propto n \cdot T^{1/2}$ .



1 - плазма, 2 - сорғыш бөлшектеріне арналған кіріс арнасы, 3 - бейтараптаушы, 4 – сорушы каналы

Сурет 1.5 - Эвакуациялық шектегіштің негізгі жобасы:

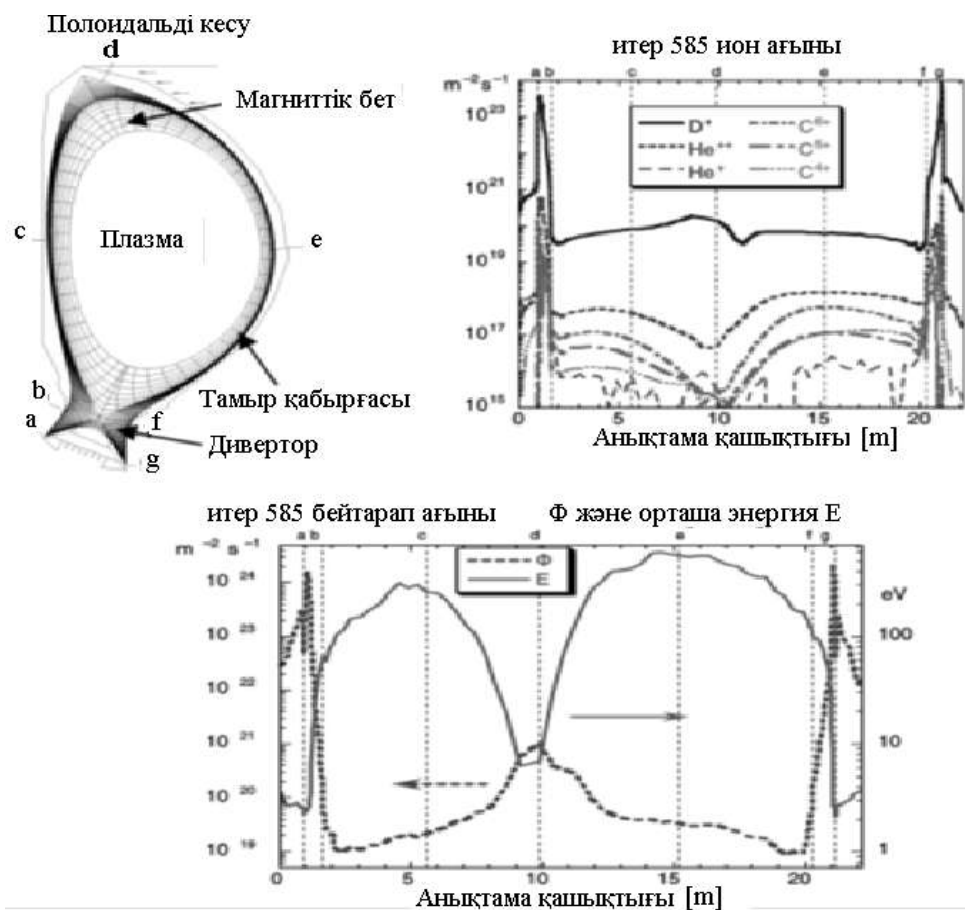
Шынында да, қабаттағы ағынның тығыздығын бөлуі  $\Gamma = \Gamma_0 \exp[-x/\lambda_\Gamma]$ , осы теңдіктен келе осылай анықталып  $\lambda_\Gamma = 2\lambda_n\lambda_T/(\lambda_n + 2\lambda_T)$  және шектегіш 1.5-суретте көрсетілген жалпы ағынның үлес салмағы мына теңдікте болады  $\exp(-d_2/\lambda_\Gamma)/\{-\exp[-(d_1 + d_2)/\lambda_\Gamma]\}$ .

## **1.2 Плазмаға айналған элементтерге түсетін бөлшектер мен энергиялар ағындары**

ИТЭР реакторында плазмаға айналған әртүрлі элементтерге бөлшектер мен энергияның күтілетін ағындары туралы жалпы түсінікті 1.6-сурет береді, онда әртүрлі иондар және бейтарап атомдар ағындарының ПАЭ түсетін реактордың көлденең қимасының периметрі бойынша есептік үлестірілу көрсетілген. Иондар ағынының тығыздығы бірнеше  $A/cm^2$  құрайтын дивертордың сыртқы «аяғының» нысаны ең үлкен жүктемеге ұшырайтыны көрінеді. Отын бөлшектерінен басқа (дейтерий және тритий иондары) ПАЭ элементтеріне гелийдің екі рет иондалған иондары түседі (диверторда қарқындылығы бойынша шамамен үш реттен, ал бірінші қабырғада шамамен екі реттен аз). Гелий иондарымен қарқындылығы бойынша салыстыруға көп рет иондалған көміртек иондарының ағындары жатады.

Қайта зарядтау бейтарап атомдар ағындарының тығыздығы диверторлы нысаналар ауданында да үлкен болады, алайда олардың орташа энергиясы өте аз. Керісінше, бірінші қабырға жоғары энергиялы бейтараптармен (медиандық жазықтықта ең ықтимал 200-400 эВ энергиясымен), бірақ ағынның балама тығыздығымен  $\sim 1 A/cm^2$  сәулелендіруге ұшырайды.

ПАЭ бетіндегі иондар мен нейтралдардың әсерінен болатын процестерді түсіну үшін өте маңызды, бірақ түсуші бөлшектерді бұрыштық үлестірілу туралы мәселе аяғына дейін зерттелмеген болып табылады, өйткені енгізу, шағылу және тозаңдалу процестері бөлшектердің бетке түсетін бұрышқа өте тәуелді екені белгілі. Біріктіргіш - қабаттағы қуат тығыздығы өте үлкен болуы мүмкін (бірнеше ондыққа  $MW/m^2$  дейін). Бірде-бір белгілі материалы мұндай жылу жүктемелеріне шыдамайды, сондықтан дивертордың қабылдау пластиналары түйіспе ауданын ұлғайту үшін жиынтық магниттік өрістің бағытына қарай сырғыма бұрыштың астында орналасады.



Сурет 1.6 - (а) ИТЭР реакторының көлденең қыймасы, (б) бөлшектердің ағындарын бөліктің периметрі бойынша бөлудің есептік мәні, (в) сондай-ақ бейтарап зарядтау және олардың энергиясы

ПАЭ үшін және жалпы реактор үшін ТОКАМАК плазмасының үзілуі, плазмалық баулардың тік сызық бойымен (VDE) жылдам ығысуы және тұрақсыздық периферияда (ELM) оқшауланған кезде ПАЭ үлкен қуатты кезеңдік шығарулар сияқты стационарлық емес процестер анағұрлым үлкен қауіп төндіреді. ELM есебінен энергия шығарудың шындық қуаты бериллийден жасалған бірінші қабырғаның қаптамасы балқыту үшін жеткілікті болуы мүмкін. Диверторға түсіп, бұл қуаттың қосымша ағыны оның элементтерінің қатты қызуына әкеледі.

Токтың үлкен үзілуі ең үлкен қауіпті төндіреді, өйткені шамамен жүздеген миллисекунд уақыт ішінде бетке  $3nT \cdot V_p$  құрамында энергия бар ыстық плазма шығарылып қана қоймай, мұнда  $V_p$ -плазманың көлемі, сонымен қатар реактор элементтерінде плазма тогымен байланысты  $LI_p^2/2$  магнит өрісінің энергиясы қосымша бөлінеді. Плазма көлемі  $V_p = 1000 \text{ м}^3$ ,  $T = 10 \text{ кэВ}$  және  $n = 10^{20} \text{ м}^{-3}$  кезінде ИТЭР ауқымындағы реактор үшін плазманың энергия құрамы  $\sim 0,5 \text{ ГДж}$  құрайды, ал плазма тогының магнитті өрісіндегі қоры  $IP \sim 15 \text{ МА}$  энергия  $\sim 10 \text{ ГДж}$  (мәліметте,  $1 \text{ ГДж}$  жедел бөлінуі  $250 \text{ кг}$  тротил баламасымен бомбаның жарылысына сәйкес келеді).



### 1.3 ПАЭ материалдарын таңдауды анықтайтын факторлар

ПАЭ материалдары мен конфигурациясын таңдауды анықтайтын факторлар арасында ең маңызды болып табылады:

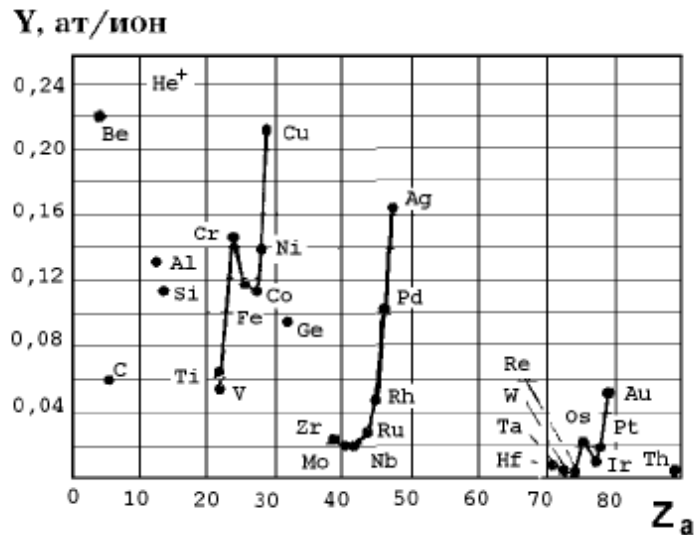
1. эрозия және материалдар атомдарының реактор параметрлеріне олардың ұстап қалу аймағына түсуі кезіндегі әсері,
2. реактордың жұмыс істеуі кезінде қуат ағындарын алу мүмкіндігі,
3. реактор материалдарында тритийдің жиналуына байланысты шектеулер,
4. нейтрондық және плазмалық сәулелендіруде материалдар қасиеттерінің деградациясы,
5. материалдардың қалдық активтілігі.

Жоғарыда аталған факторлардың ішінен бірінші қабырғаны қорғау ретінде материалды, дивертор мен лимитер пластиналарының материалдарын пайдалану мүмкіндігін анықтайтын неғұрлым сыни болып жылу эрозиясы, физикалық тозаңдану, сондай-ақ блистеринг, флекинг, механикалық қасиеттерінің өзгеруі сияқты материал қасиеттерінің деградациясына алып келетін газ қоспаларының жиналуы табылады.

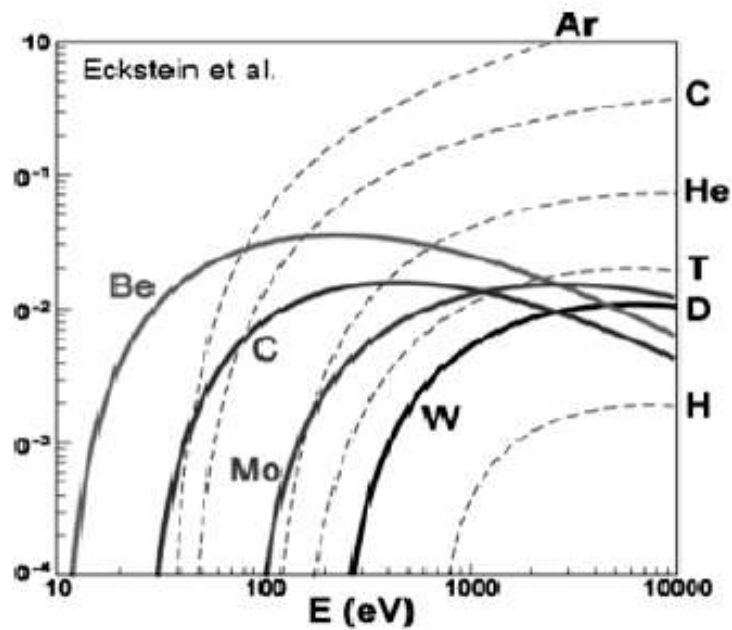
#### *1.3.1 Эрозия және материал атомдарының ұстап тұру аумағына түскен кездегі реактордың параметрлеріне әсері.*

ПАЭ-ге түсетін бөлшектер мен қуаттың ағынының сипаты ПАЭ материалы мен оның конструкциясын таңдауды анықтайды. Қуатты алудан бөлек ПАЭ материалдары дейтерий-тритийлі плазманы ластамауы тиіс. [11]-де плазмадағы атомдық нөмірі  $Z$  үлкен болатын элементтердің аз ғана қоспасының  $Z$ -ке квадратты тәуелді болатын бөгеліс сәулесі бар плазмадан энергияның шығындалуын бірден арттыратыны көрсетілген. Сондықтан тек есептеулер ғана емес, термоядролық зерттеулердің көп жылдық тәжірибелері де плазманың ең жақсы параметрлеріне атомдық нөмірі кіші материалдарды қолданып қол жеткізуге болатынын көрсетеді. Осылай, америкалық TFTR токамакта қабырғаларын литиймен қаптаған соң ғана плазма температурасын 40 кэВ-ке жеткізу мүмкін болды. Осы мақсатта қабырғаларды, оларды брондау немесе ПАЭ графиттер үшін қолдану арқылы кондициялаудың әр түрлі шаралары пайдаланылады. Дегемен плазманың орташа атомдық нөмірі (орташа  $Z$  мәні) сонымен қатар ыстық плазма аймағына түсетін қоспа мөлшеріне де тәуелді болады. соңғысы скреп-қабаттың тиімділігімен ғана емес, қабырғалардың материалдарын оларға плазмадан түсетін бөлшектермен тозаңдату коэффициентімен де анықталады. Белгілі болғандай [12-17], физикалық (немесе кинетикалық) тозаңдану коэффициенті материалдың атомдық нөміріне монотонды емес тәуелді болады (1.7-сурет), энергияға да монотонды емес тәуелді болады және энергия бойынша табалдырыққа ие болады, одан төмен болған кезде материалдың тозаңдануы болмайды.





Сурет 1.7 - Тозандану коэффициентінің нысананың атомдық нөміріне тәуелділігі (400 эВ энергиялы  $He^+$  ионы үшін)



Сурет 1.8 - Әр түрлі W иондармен (үзік сызық) және әр түрлі материалдардың D иондарымен физикалық тозаңдату коэффициенттерінің есептік тәуелділігі

Тозаңдану  $Y$  коэффициентінің  $M$  нысананың атомдарының массасына және бөлшектердің энергияларына тәуелділігі жалпы түрде кейде мына формуламен аппроксимацияланады:

$$Y = 6,4 \cdot 10^{-3} \zeta^{5/3} M_2 \left( \frac{E}{E_{th}} \right)^{1/4} \left( 1 - \frac{E_{th}}{E} \right)^{7/2} \quad (1.6)$$

мұндағы  $E_{th}$ — тозаңдану табалдырығына сәйкес келетін энергия. Бұл формуланы  $E/E_{th} < 20$  болғанда қолдануға болады. 2 көбейткішіне дейінгі дәлдікпен тозаңдану табалдырығы эмпирикалық қатынастардан бағалануы мүмкін:

$$E_{th} = U / \int (1 - \int) \text{ мұнда } M_1 < 0,3 \cdot M_2$$

$$E_{th} = 8 \cdot U (M_1 / M_2) \quad (1.7)$$

1.7,1.8-суреттерден және келтірілген формулалардан, егер ПАЭ-ні вольфрамнан жасаса және сутегі мен гелийдің түсетін изотоптарының энергиялары 100 эВ-тан аспауын қамтамасыз етсе онда материалдың эрозиясының минимумына келтіруге болатыны көрінеді.

Сутегімен химиялық әрекеттесетін немесе оттекті плазма құрамында қоспа түрінде болатын материалдар үшін химиялық тозаңдану да тән болады.

ПАЭ материалдарының тозаңдану коэффициентіне плазманың қажетті параметрлерін алу ғана емес, сонымен қатар реактордың ұзақ уақыт бойы жұмыс істеуге қабілетті болуы да тәуелді болады. ОПЭ плазмадан түсетін бөлшектермен, мысалы, қайта зарядтау бейтарап атомдарымен үздіксіз тозаңдатылатындықтан ОПЭ әзірлеу кезінде сол немесе басқа элементті ауыстыруға дейін мүмкіндік беретін «құрбандық қабатының» материалының қалыңдығын алдын ала анықтауға болады. Зарядталған бөлшектер шоғының әсерінен тозаңдату дивертонды құрылғыларды дайындау үшін шектеуші факторлардың бірі болатындықтан материалдарды физикалық тозаңдатудың негізгі заңдылықтарын толығырақ қарастырамыз.

### *1.3.2. Иондық сәулелендіру кезіндегі физикалық тозаңдату.*

Тозаңдату – қатты денені үдетілген бөлшектермен сәулелендіру кезінде беттің атомдарын шығару – ұшып келетін бөлшек пен материалдың беткі қабатындағы атомдардың соқтығысуларының нәтижесінде болады. Тозаңдану иондық бомбалау кезінде пайда болатын қатты дененің бетінің маңындағы атом-атомдық соқтығысулардың каскадтарының дамуынан болады. Бомбалаушы бөлшектермен тозаңдату салдарынан қатты дененің беті бұзылады.

Тозаңдату эффекті жеткілікті ерте кезден белгілі және кері әсерімен, яғни, бетті бұзуымен қатар, қазіргі кезде беттерді тазарту, жұқа қабыршақтар алу және т.б. үшін жеткілікті түрде кең қолданыс табуда. Термоядролық синтез реакторлары үшін тозаңдату эффекті өте кері әсерін береді, өйткені, термоядролық плазманың жұмыстық сипаттамалары төмендейді, плазмаға айналған конструкциялық материалдар бұзылады. Сондықтан зарядталған үдетілген бөлшектермен әрекеттескенде тозаңдатуға ең аз ұшырайтын конструкциялық материалдарды таңдау міндет болып табылады.

Қатты денелерді тозаңдату қатты денелерді тозаңдату процесінің механизмдері бойынша ажыратылатын бірнеше түрге бөледі: серпімді процестер (ядролық тежелу) басым болатын қатты денелерді физикалық, немесе иондық тозаңдату; серпімді емес процестер есебінен қатты денелерді тозаңдату – қатты дене атомдарын қоздыру және иондау нәтижесінде; түсетін бөлшектер қатты дененің атомдарымен реакцияға түскенде пайда болатын қатты денелерді химиялық тозаңдату, нәтижесінде бетте ұшқыш қоспалар түзіледі. Қатты денелерді тозаңдатудың бірнеше механизмдерінің үйлестірілуі мүмкін.

Қатты денелерді тозаңдату процесінде беттің құрамы, құрылымы және топографиясы өзгеруі мүмкін. Қатты иондардың әсерінен мкм өлшемді конустар мен пирамидалар, жоталар, жырашықтар және шұңқырлар түзіледі. Жеңіл иондармен сәулелендіргенде беткі қабатта газ көпіршіктері пайда болуы мүмкін, ол беттің ісінуіне (блистерингке), қабыршақтануына және қабаттануына алып келеді.

Қатты денелерді соқтығыстырып тозаңдату теориялары, (мысалы, Зигмунд теориясы [18] бомбалаушы бөлшектердің кинетикалық энергияларының нысананың атомдарына берілуіне серпімді соқтығысулардың каскадтарын қарастыруға негізделген. Қатты денелерді соқтығыстырып тозаңдату 3 режимге бөледі. Тура шығару режимі тозаңдану табалдырығының маңында жеңіл иондармен бомбалау кезінде және сырғанап түсу кезінде жүзеге асырылады; каскадтардың ұзақтығы үлкен емес, демек, үлесті алғашқы шығарылған атомдар береді (сурет 1.9). Сызықты каскадтар режимі (энергиялары 1 ден бірнеше ондаған кэВ-ке дейін болатын ең ауыр иондар мен нейтрондардан басқа барлық иондар үшін жүзеге асырылады) шығарылған атомдардың үлестірілуінің аз тығыздығымен сипатталады, сондықтан қозғалыстағы атомдардың қозғалмайтын атомдармен соқтығысуы басым болады, ал қозғалыстағы атомдардың өзара соқтығысуы сирек болады. Сызықты емес каскадтар (жылулық шындыр) режимі массалары үлкен иондар мен молекулалық иондар үшін жүзеге асырылады. Шығарылған атомдардың үлестірілу тығыздығының жоғары болатыны соншалық, кейбір көлемдердің іштеріндегі атомдардың көпшілігі қозғалыста болады.



Сурет 1.9 - Тозаңдату режимдері

Тозаңдату процестерін зерттеуге жеткілікті үлкен назар аударылуда, солай Фальконе [12.6.24] мен Беришаның [19-20] жалпылама теориялық және эксперименттік шолу жұмыстарын атап кетуге болады. Тозаңдану коэффициентін эксперименттік анықтағанда зарядталған бөлшектермен сәулелендірген кездегі беттік эрозиясының өскен шамасын анықтайды.

Тозаңдату кезіндегі эрозия  $K_s$  тозаңдату коэффициентімен – бір түсетін бөлшектің беттен шығаратын атомдарының орташа санымен сипатталады:

$$K_s = N_{sa} / N_I, \quad (1.8)$$

мұндағы  $N_{sa}$  – тозаңдатылған атомдар саны,  $N_I$  – бетті бомбалайтын иондар саны.  $N_{sa}$ -ны эксперименттен анықтап, иондық сәулелендірудің  $\Phi t$  флюенсін, яғни беттің сәулелендірілетін бірлігіне түсетін иондардың қосындылық санын және сәулелендірілетін беттің ауданын біліп түсетін иондар санын анықтауға болады.

$$N_I = \Phi t \times S \quad (1.9)$$

мұндағы  $S$  – сәулелендірілетін беттің ауданы және (1.9) формула бойынша тозаңдану коэффициенті есептелді.

Егер  $T$  температура нысананың балку температурасына жақын болмаса, немесе зерттеу жүргізіліп отырған температуралар аралығында нысанада фазалық ауысулар орын алмаса, онда  $K_s$  коэффициенті температурадан әлсіз тәуелді болады. Фазалық ауысулар кезінде температура аз өзгерген жағдайдың өзінде  $K_s$  коэффициенті дереу өзгереді. Сол сияқты  $K_s$  коэффициенті қандайда бір уақыт аралығындағы сәулелендіру энергиясынан (флюенс) және сәулеленетін бет күйінен, атап айтқанда беттегі түйнектердің өлшемінен, текстурасынан және беттің кедір-бұдырлығынан тәуелді болады.

Осы себепті құрылымы мен дайындалу әдісі ескерілетін нақты материал үшін  $K_s$  коэффициенті анықталуы қажет. Тозаңдандыру коэффициентін өлшеу салыстырмалы түрде қиын эксперименттік жұмыс болып табылады, өйткені, біріншіден иондармен атқылау энергиясының ажыратылымдығы жоғары үдеткіш қажет, себебі, басқа жағдайда бетке келіп түсетін иондар энергиясынан тозаңдандыру коэффициентінің тәуелділігін анықтау мүмкін емес. Екіншіден, тозаңданған зат массасын дәл анықтайтын аспап қажет болады. Тозаңдандыру коэффициентін экспериментте анықтау үшін әдетте салмақта өлшеу әдістері [21, 22], иондық соққылау негізіндегі рентгендік сәулелерге спектрлік талдау жасау әдісі және алдын ала келтірілген радиоактивтіліктің өзгерісін тіркеу әдісі қолданылады.

Қатты денелер үшін өлшенген физикалық тозаңдандыру коэффициенті әдетте әрбір бетке түскен ион үшін 1-5 атомды құрайды, бірақ кейбір элементтер үшін 100 атом/ионға дейін жетеді. Ал диверторды дайындау кезінде қолданылатын графит, молибден, вольфрам және олардың қорытпаларынан жасалған материалдар үшін тозаңдандыру коэффициенті аргон иондары үшін

шамамен 1-2 атом/ионға тең. Графитпен вольфрам материалдары [19.б.28] жұмыста қойылған шарттарды қанағаттандырады, ал молибден мен оның қорытпаларынан жасалған материалдар үшін тозаңдандыру коэффициенті әлдеқайда жоғары болып тұр. Осы параметрлерге сәйкес дивертор материалы ретінде қолдану үшін графит пен вольфрам бірдей мүмкіндікке ие, алайда химиялық тозаңдану кезінде графиттен сутегі мен оттегіден тұратын тез ұшқыш қосындылар пайда болуы себебінен графитті қолдану шектеліп отыр. Сондықтан басты назар вольфрамға түседі. Тағы бір ескеретін жайт, тозаңдандыру коэффициенті материалдың құрылымы мен құрамына тәуелді, осы себепті вольфрамның өзінің нақты маркасын таңдау өте маңызды.

### *1.3.3 Жергілікті балқыту мен буландыру кезіндегі жылулық эрозия.*

Вольфрамды реакторлық масштабтағы қондырғылардың бірінші қабырғаларының құраушыларын дайындау үшін қолдану жоспарлануда: ИТЭР-де вольфрам дивертор (1.10-сурет) пайдаланылатын болады, вольфрамды термоядролық нейтрондар көзінде (ТНК) және ДЕМО реакторында пайдалану мәселелері қарастырылуда. Вольфрам ИТЭР диверторын пайдалану қосымша сынақтар мен вольфрамның жоғары импульсті плазмалық жүктемелер, оның ішінде үзілулер, ЭЛМ-дер (ағыл. ELMs - edgelocalized modes) және тағыда басқа кезіндегі тұрақтылығын зерттеуді талап етеді [23-26]. Вольфрамның қуатты плазмалық-жылулық жүктемелерге тұрақтылығын зерттеу JET, AUG, Alcator C-Mod, T-10 токамактарындағы, LHD стеллараторындағы, сызықты плазмалық қондырғылардағы, КСПУ-Т типті сызықты плазмалық үдеткіштердегі, электрондық және иондық-сәулелік қондырғылардағы эксперименттерде, лазерлік эксперименттерде жоспарлануда және жүзеге асырылуда [27-29].



Сурет 1.10 - Вольфрам диверторлы ХЭТР пластиналары

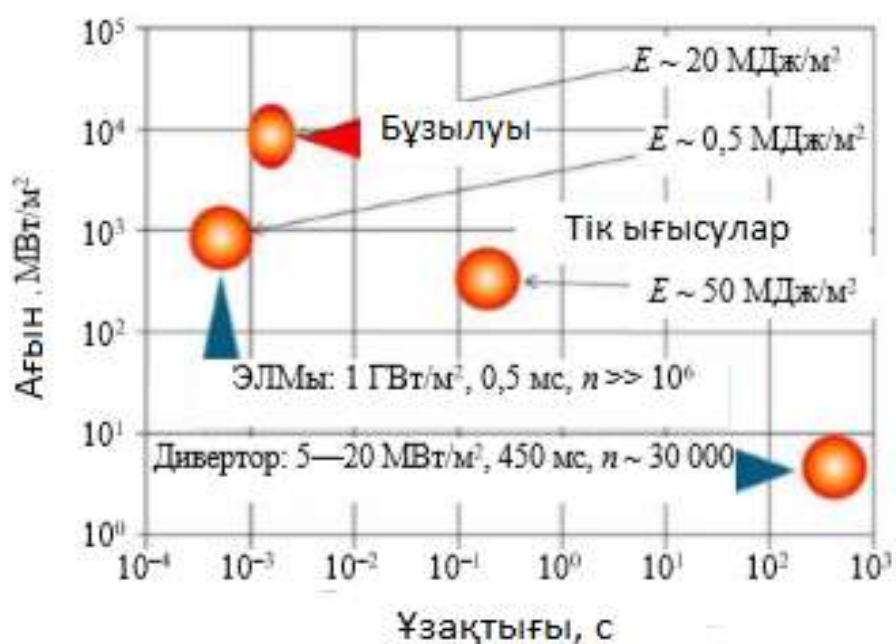
Бірінші қабырға мен дивертордың элементтерінің материалдарының ең қарқынды эрозиясы плазманың үзілуіне, аз уақыттағы энергияның бақылаусыз шығарылуы қабырғаның жергілікті учаскелерінің қызып кетуіне алып келген кезде, күтіледі, осының салдарынан олардың тозаңдануы мен булануы болады [30].Токомактардағы плазманың үзілулері ток импульсінің қалыпты қалыптасуының бұзылуы болып табылатынына, төтенше, аномальді құбылыс болып саналатынына қарамастан, плазма көлемінің барлығын дерлік қабырғаға шығаруға алып келетін тұрақсыздықтың дамуын болдырмау әлі қолдан келер емес. Осы құбылыстың салдарын, сонымен қатар ТЯР-ды қауіпсіз пайдаланумен байланысты зерттеулерге қазіргі кезде ерекше назар аударылады.

ХЭТР масштабты токамакта дивертор пластинасына жылулық жүктемелер дейтерий-тритийлі разрядтың стационарлы сатысында  $\sim 10 \text{ МВт} \times \text{м}^{-2}$ -ге жететін болады, ол пластина температурасының орташа  $\sim 1100^\circ\text{C}$ -қа дейін жоғарылауына алып келеді; үзілістер мен ЭЛМ-дерде диверторлы пластиналарға импульсті қысқа уақытты жүктемелер гигаваттық масштабтағы шамасына  $0,6\text{—}3,5 \text{ ГВт} \times \text{м}^{-2}$ -ге [31] жетеді, бұл материал температурасының жоғарырақ температураға дейін периодты артуына алып келеді [32]. Вольфрамды дивертор пластинасы ретінде қолданған кезде мұндай күшті жүктемелер беттің қатты қызып кетуіне және тіпті вольфрамның балқуына алып келуі мүмкін [26-29, б.29]. Циклді қуатты жылулық жүктемелер кезінде ЭЛМ-дардың әсерінен вольфрам пластиналардың беттерінің температуралары қайта кристалдану температурасынан жоғары болуы мүмкін, бұл вольфрамның микроқұрылымының өзгеруіне, түйіршіктердің өсуіне, механикалық қасиеттерінің нашарлауына және сыңғақтануға алып келеді. Сондықтан мүмкін болатын балқу мен вольфрамның шытынауының, беттік қабаттардың қайта кристалдануының, осындай қабаттар бұзылған соң тозаң бөлшектерінің түзілуінің, критикалық және субкритикалық жүктемелер кезіндегі ХЭТР -де вольфрам пластиналардың беттерінде біртекті емес және кеуекті қабаттардың қалыптасуының салдарын бағалау қажет. Вольфрамның күшті плазмалық-жылулық жүктемелер кезіндегі тұрақтылығының барлық сипаттамаларын анықтау келесі буындардағы термоядролық қондырғылардағы бірінші қабырғаның мәселесін шешу үшін де маңызды.

Заманауи ірі токамактардағы (JET, E-10) және LHD стелларатордағы эксперименттердегі вольфрамға жылулық жүктемелер ХЭТР -де күтілетін жүктемелер деңгейіне жетпейді. Сондықтан материалдарды қарқынды плазмалық, корпускулалық және лазерлік сәулелендіру жағдайларында сынақтан өткізу мен зерттеу қазіргі кезде басқа да қондырғыларда жүргізіледі, мысалы, [33-36] жұмыстарда осындай зерттеулердің әр түрлі әдістеріне шолулар келтіріледі. КСПУ-Т [37,38], КСПУ-Ве, КСПУ-Х50 [39] типті квазистационарлық плазмалық үдеткіштерде сынақтық үлгілер қуаты  $5 \text{ ГВт} \times \text{м}^{-2}$ -ге дейінгі күшті импульсті плазмалық немесе ұзақтығы миллисекундтан аз сәулелендіруге ұшыратылады, бұл ИТЭР-дің диверторлық пластиналарына жылулық жүктеменің деңгейін ұқсатады. Электрон шоқтары бар қондырғыларда (Германияда JUDITH-2 [40], Ресейде IDTF [41], Еуропада

FE200, Жапонияда JEBIS [42] жәнет.б.) жоғары қуатты электронды шок қолданылады. Мысалы, JUDITH-2-де 200 кВт-қа дейін, IDTF-те 800 кВт-қа дейін, JEBIS-те 60 кВт-қа дейін), оларды үлгінің беті бойынша сканирлеу жоғары жылулық қуатпен сәулелендіруді қамтамасыз етеді.

ХЭТР -де күтілетін, ПАЭ бетіне жоғарылатылған жылулық жүктемелер [43,44], 1.11-суретте көрсетілген. Дивертордың вольфрам пластинасына максималды жүктемелер  $77\text{—}123 \text{ МДж}\times\text{м}^{-2}\times\text{с}^{-1/2}$  деңгейдегі жылулық ағын факторына жетуі және тіпті тогы 7,5 МА, плазманы қыздыру қуаты  $P = 40 \text{ МВт}$  және плазманың энергия мөлшері 75 МДж болғанда ИТЭР жұмысының бірінші сатысының өзінде вольфрамның балқу факторынан  $W$  (ол  $\sim 50 \text{ МДж}\times\text{м}^{-2}\times\text{с}^{-1/2}$ ) артуы мүмкін. ХЭТР -дегі тік ығысу оқиғасы берилийден жасау жоспарланған, камераның жоғары бөлігіндегі жоғарылаған жүктемелерге (1.4-суретті қараңыз) алып келуі мүмкін. Осындай критикалық жүктемелердің ықтимал мүмкіндігі бірінші қабырғаның осы бөлігіндегі берилий қаптаманы вольфрам қаптамаға ауыстыру туралы мәселе қоюы мүмкін. Жылу мен бөлшектердің құрастырылған эффектілері кейбір жағдайларда импульстік жүктемелер кезінде беттің бұзылуын және эрозиясын күшейтуі мүмкін [26,б.29]. Сонымен қатар, беттің вольфрам кеукеті бетпен (мамық сияқты — ағыл. fuzz) және Не иондарының әсерінен болатын кеукетермен бұзылуын [26,б.29;45] шектеуді көрсететін, үміттендіретін эксперименттік нәтижелер пайда болды.



Сурет 1.11 - ИТЭР-дегі күтілетін жылулық жүктемелер: - критикалық жүктемелер

Плазманы магнитті ұстап тұратын термоядролық қондырғыларда (токамактарда, стеллараторларда және сызықты қондырғыларда) қуатты плазмалық-жылулық жүктемелерде вольфрамның эрозиясы мен бұзылу



процестерін қатаң жіктеу қазіргі кезге дейін толық жасалмаған. Бұл вольфраммен термоядролық қондырғыларда жасалған эксперименттерде алынған деректердің салыстырмалы аз көлемімен байланысты. Мұндай жіктелімге жалпы амалдар металлургияда белгілі бұзылу процестерін талдауда, сондай-ақ вольфрамды қарқынды плазмалық, корпускулалық және лазерлік сәулелендіруді қамтамасыз ететін термоядролық емес қондырғыларда сынақтан өткізу кезінде алынған деректерді талдауда тұрғызылады. Осындай қондырғыларда материалдарды бұзу процестерінің магнитті ұстап тұратын термоядролық қондырғылардағы плазма-қабырға әрекеттесуі кезінде жүретін процестерге толық сай келмейтінін айта кету керек.

Токамактар үшін мәселенің күрделлілігінен маңызды болатын бірнеше механизмдер жеке қарастырылады, бұл мәселені түсінуде алға жылжуға мүмкіндік береді. Бұл ретте мынадай эффекттер қарастырылады:

1. Плазманың ЭЛМ-дары мен үзілістерінің әсері кезінде:

- механикалық беріктік үшін қауіпті шытынау;
- беттік қабаттың балқуы;
- толқындық бедер, кедір-бұдырлық қалыптастырумен балқытылған қабаттың тұрақсыздығы;
- балқытылған металдың бет бойымен тасымалдануы (ең күшті жергілікті эрозия);
- тамшылық эрозия (балқытылған беттен материалдың шығынының негізгі механизмі);

2. Эрозияға алып келетін булану мен қайнау (қуаттың аса жоғар ағындары кезінде);

3. Балқытылған қабаттың қайта кристалдануы мен қатаюы:

- шытынау;
- балқытылған қабат қатайған кездегі бедерінің өзгеруі;

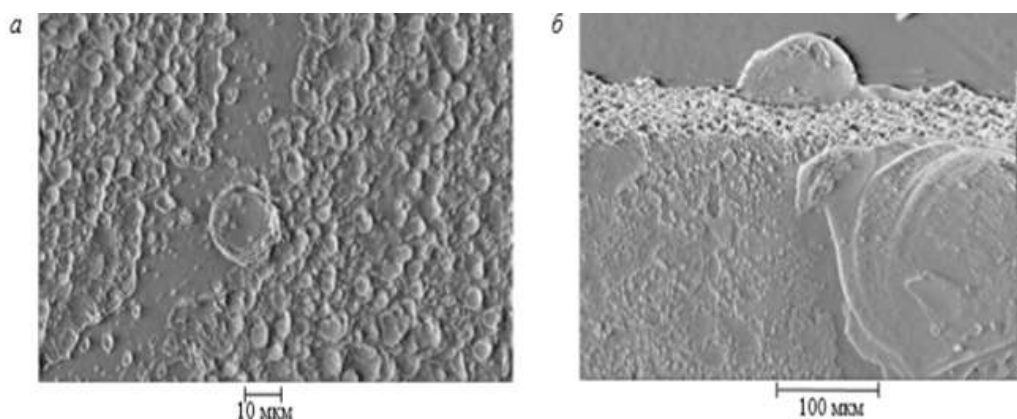
4. Термоциклдеу кезінде (материал температурасын периодты арттыруда):

- тозғаннан бұзылу,
- шытынау (механикалық беріктіктің деградациясы).

Жоғарыда аталған эффекттерді сынақтан өткізіп зерттеулердің негізгі нәтижелерін келесідей түрде қосындылауға болады:

Тамшылы эрозия. Материалдарды (металдар мен көмірграфитті материалдарды) әр түрлі қондырғыларда, соның ішінде, плазмалық үдеткіште сынақтан өткізу [35,36,б.30;46-48], қуатты плазмалық жүктеме кезінде материалдың бетінің жиынтық эрозиясына материалды балқыту беттен тамшылардың эжекциясы эффектісіне айтарлықтай үлесін көрсетті. Мұндай эффектін, атомдар, иондар, кластерлер түріндегі эрозиядан ерекшелігі, тамшылы эрозия деп атайды, яғни тозаңданудың эрозияға үлесі. Вольфрамның тамшылы эрозиясының мысалы 1.12-суретте көрсетілген.



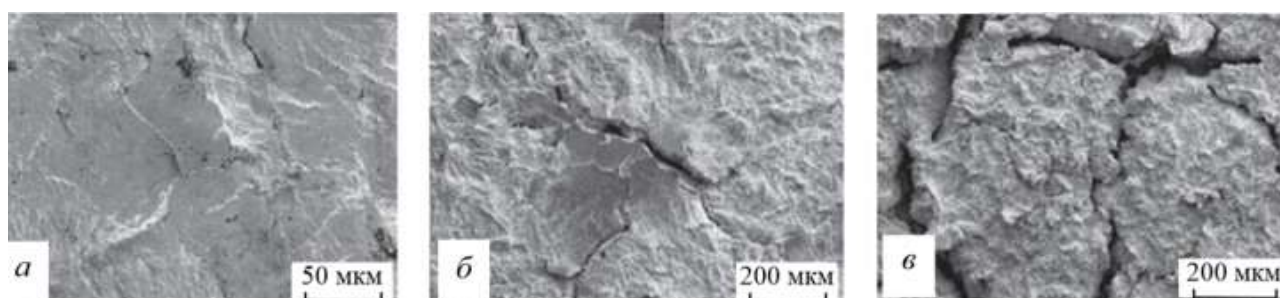


а — беттің балқуы; б — тамшылы эрозия

Сурет 1.12 - Плазмалық үдеткіште сынақтан өткізгеннен кейінгі вольфрамның бетінде қатқан тамшылар

Импульстік жүктемелер (эрозия және бетте сызаттардың түзілуі). ХЭТР - де плазманың үзілістері мен ЭЛМ-дерде жылулық жүктемелер шарттарын моделдеу үшін сандары бірден бірнеше мыңға дейін болатын тізбекті разрядтар сериясының импульсті плазмалық қондырғыларында сынақтан өткізу әдістемесі қолданылады. Сынақтарды лазерлік қондырғыларда да, сондай-ақ, квазистационар плазмалық разряд пен біріктіріп әсер ету кезінде және бірізгілікте электрон шоғымен жүктеу кезінде де жүргізеді. Вольфрамды осылай сынақтан өткізу кездерінде беттің бұзылуы мен модификациясының бірнеше эффектілері пайда болады, оның ішінде, шытынау, қайта кристалдану және беттік қабаттың балқуы.

Вольфрам нысананың электрон шоғымен (JUDITH-2 қондырғысында, Германия) (1.13-сурет) және бейтарап қуатты ағындармен (GLADIS қондырғысында, Германия) сынақтан өткізгеннен кейінгі құрылымын зерттеу осындай нәтижелер көрсетті: бетке перпендикуляр бағдарланған колонна тәрізді түйіршіктері бар қайта кристалданған қабаттың қалыптасуы [49].(1.13-сурет).



а - 1000 импульстен кейін, б - 10000 импульстен кейін, с - 100000 импульстен кейін

Сурет 1.13 -  $0.41 \text{ ГВт} \times \text{м}^{-2}$  электрон шоғымен сынақтан өткізгеннен кейінгі вольфрамның бетіндегі сызаттар

Вольфрамның келешекті таңбаларының беттерінің құрылымына, физикалық-механикалық қасиеттеріне және эрозиясына электрондар және иондар шоқтарының импульсті ағындарының әсерін зерттеу қазіргі кезде ТЯР-дағы плазманың үзілістерін моделдейтін жаңа қондырғыларды қолданумен белсенді түрде жалғасуда [50-54].

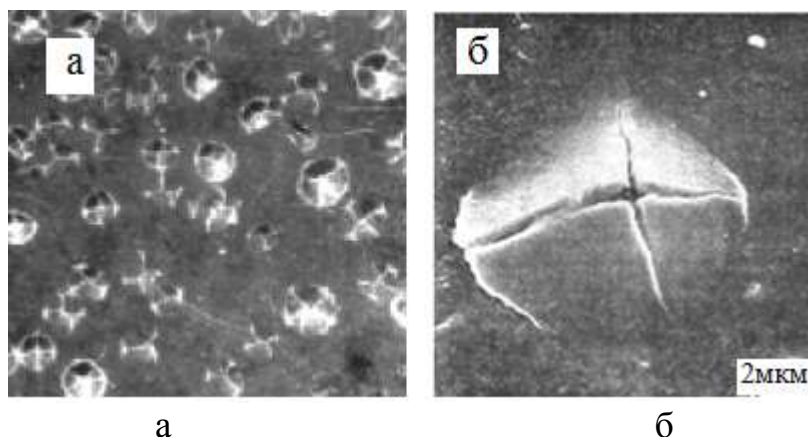
Күшті жылу жүктемелері кезінде вольфрамның механикалық қасиеттерінің эрозиясының және тозуының үлгілері әлі толық орнатылмағанын ескере отырып, диссертацияның міндеттерінің бірі - электронды сәулелердің және плазма импульстік әсерінен эрозиясының процестерін және вольфраммен графиттің механикалық қасиеттерін өзгертуін білу, ТЯР ішіндегі жылу жүктемесіне сәйкес келетін жағдайларды өзгерту болып табылады.

#### *1.3.4 Сутегімен және гелий иондарымен сәулелендірудің плазмаға айналдырылған материалдардың құрылымы мен қасиеттеріне әсері*

Диверторды, лимитердің пластинасының материалының бірінші қабырғаның қорғанысы ретінде қолдану мүмкіндігін анықтайтын ең сыни факторлардың біреуі газ қоспаларының жинақталуы болып табылады, ол материалдың, беттің ісінуі (блистеринг), қабыршақтану (флекинг) сияқты қасиеттерінің деградациясына, және осыдан болатын механикалық қасиеттердің өзгеруіне алып келеді.

Блистеринг құбылысы салыстырмалы түрде бұрыннан белгілі және әр түрлі материалдардағы осы құбылыстың заңдылықтарын зерттеуге жеткілікті көп назар аударылады, шолуларды қараңыз [44,б.31;55].

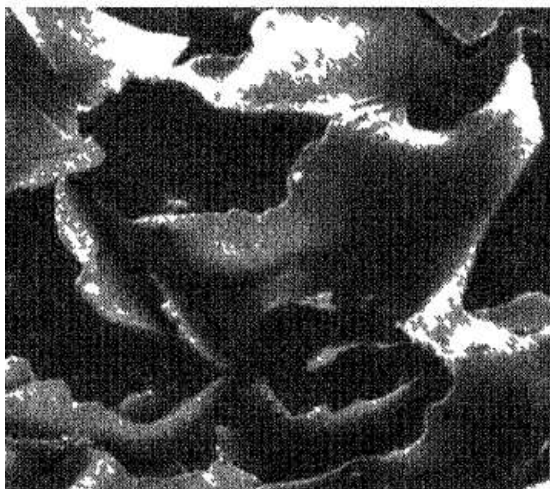
Алғаш рет блистеринг (беттің ісінуі) 1963 ж изоляторларды сутегі, дейтерий және гелий иондарымен [56] сәулелендіру кезінде анықталды. Металдардағы блистеринг біраз кейінірек 1966 ж сутегі және гелий иондарымен сәулелендіру кезінде байқалды [57] 1- а суретті қараңыз. Сәулелендіру флюенсінің артуымен блистерлер бетке ашылады, блистердің қақпағы ұшып кету жағдайы, 1.14 –б суретте кескінделген.



а – ванадий бетіндегі блистерлер, энергиясы 10 кэВ, флюенсі  $6 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$  He иондарымен сәулелендірілген; б – блистердің ашылуы, мыс, энергиясы 200 кэВ дейтерий иондары

Сурет 1.14 - Ванадий мен мыстың бетіндегі блистеринг

Блистерингпен қатар беттік қабаттың алыстауы болады және ереже бойынша қабаттанған қабаттар өлшемдері бойынша блистерлерге қарағанда үлкен. Осы құбылысты қабыршақтану (flaking) деп атады, 1.15-суретті қараңыз.



Сурет 1.15- 200<sup>0</sup>С сәулелену температурасы кезіндегі ОХ16Н15МЗБ тот баспайтын болаттың бетіндегі флекинг, иондар флюенсі  $\text{He } 3 \times 10^{18} \text{ см}^{-2}$  [53,б.34]

Блистерингтің заңдылықтарын зерттеу термоядролық реактордың материалтанулық мәселелері үшін де, материалдар нашар еритін газдардың иондарымен сәулелендірілетін басқа міндеттер үшін де үлкен қызығушылық тудырады. Қазіргі кезде газ иондарымен моноэнергетикалық сәулелендіру кезіндегі блистеринг пен флекингтің негізгі заңдылықтары зерттелген. Дегенмен нақты материалдар мен иондардың энергетикалық сипаттамалары үшін осындай зерттеуле жүргізу керек. Блистеринг плазмаға айналдырылған ТЯР материалдарының эрозиясының ең қауіпті механизмдерінің бірі ретінде қарастырылады. Бұл гелийлі блистеринг кезіндегі, және әсіресе қабыршақтану кезінде, эрозия коэффициентінің сол материалды гелий иондарымен тозаңдату коэффициентінен 1-2 ретке, сутегі иондарымен тозаңдату коэффициентінен 2-3 ретке арттыра алуымен түсіндіріледі.

Блистерлердің немесе қабыршақтанудың пайда болуы үшін нашар еритін газ иондарымен сәулелендірудің біраз минималды дозасы (флюенс), яғни, блистерлердің түзілуінің критикалық дозасы (флюенс)  $\Phi_{кр}$  қажет. Критикалық доза  $\Phi_{кр}$  иондардың типіне және иондардың энергиясына және сонымен қатар материалдарға тәуелді болады.

Сондай-ақ, дозамен сәулелендіру уақытында иондардың  $R_p$  ену тереңдігінен (нақтырақ, блистер қақпағының қалыңдығы) үлкен қабат тозаңданса, онда нысананың беттік қабатындағы газ атомдарының концентрациясы әрқашан критикалықтан кіші болады және блистерлер түзілмейтіні көрінеді. Осы жерден блистердің түзілуінің табиғи шарты шығады:

$$K_s \times \Phi_{кр} < R_p \times N_a, \quad (1.10)$$

мұндағы  $K_s$  – тозандану коэффициенті,  $N_a$  – көлем бірлігіндегі нысананың атомдарының саны.

Соңғы кездері В блистеринг және флекинг кезінде материалдың эрозиясын азайту тәсілдері әзірленуде. Осындай тәсілдердің бірі – сәулелендірілетін материалдың жұмыс температурасын, яғни жоғары температураларды таңдау, өйткені жоғары температураларда блистерлер түзілмейді, немесе беттің қабыршақтануы болмайтын төменгі температураларды таңдау. Дегенмен эрозияны азайтудың бұл жолы қондырғының жұмыс температурасымен шектелген. Блистеринг кезіндегі эрозияны азайтудың екінші жолы – материалды суық илеу. Суық иленген үлгілер үшін блистерлер түзілуінің критикалық дозасы төмендегенімен, блистерлердің ашылуы мен олардың қақпақтарын жұлып алу жасытылған үлгілерге қарағанда үлкен дозаларда өтеді. Сонымен қатар, қабыршақтану жүретін температуралық аралық суық иленген үлгілер үшін кіші. Тұтасымен алғанда суық илеу эрозия жылдамдығын төмендетеді.

Блистеринг материал дайындаудың арнайы технологиясының көмегімен айтарлықтай азайтылуы немесе толығымен басылуы мүмкін. сонымен, егер нысана,мысалы, ұнтақты қыздырып біріктіру әдісімен алынған кеуек зат түрінде және кеуектердің ара қашықтығы блистерлердің минималды диаметрлерінен кіші болса, онда газдың кеуектер бойынша бөлінуі үшін жақсы жағдай жасалады, және тіпті материалда микросызат түзілсе де блистеринг түзіле алмайды және газ сызат бойымен кеуекке бөлінеді. Шындығында қыздырылып біріктірілген алюминийлі және бериллийлі ұнтақтарда блистеринг байқалмайды [58, 60]. Сонымен қатар кеуек материалдардың тозандану коэффициенті кіші болатынын айтамыз. Алайда оларды қолдану вакуумдық сородың қиындықтарымен, жылу өткізгіштіктің нашарлауымен шектелуі мүмкін. Блистеринг және флекинг есебінен материалдың эрозиясын төмендетудің мүмкін болатын әдісі материалды гелийдің имплантацияланған атомдарына арналған тұзақ болып табылатын қоспалармен легирлеу болып табылады.

Гелийдің жинақталуы тек блистеринг пен флекинг түзілуіне ғана алып келмейді, сонымен қатар физикалық-механикалық қасиеттердің деградациясына – морттануға, гелийлі ісінуге алып келеді. Аустенитті болаттардағы бірнеше ондаған гелийдің болуы айтарлықтай морттануды туындатады, ол бұзылу сипатының транскристаллитіден кристалл аралық шытынауға дейінгі өзгерісімен қатар жүреді [61, 62]. Гелийдің аустенитті болаттардың беріктік қасиеттеріне әсерін зерттеуде дәнекерленген байланыстардың морттану мәселесі ерекше орын алады, гелийдің 5...10 атм концентрациясында және  $T=1473$  К дейінгі аз уақыттық қыздыруларда гелийлі көпіршіктердің түзілуі, морттануға және сынуға дейінгі циклдер санының жылдам азаюы байқалады [63,64].

#### **1.4 Қорытындылар және зерттеу міндеттерін қою**

Жоғарыда келтірілген әдеби шолудан қазіргі кезде плазмаға айналдырылған материалдар ретінде ең келешектісі камераның қаптамасы ретінде, яғни бірінші қабырғаны қорғайтын материал ретінде берилийдің және дивертор, және мүмкіндігінше, лимитер материалы ретінде вольфрамның қарастырылатыны келіп шығады [65].

Көміртегі негізіндегі әр түрлі материалдар тек өздерінің қиын балқитындығымен ғана ұқсас, қалған жақтарынан қасиеттерінің айтарлықтай өзгешеліктері бар. Қажетті жылуды шығару қабілеті мен қаптаманың максималды қалыңдығын қамтамасыз ету үшін оның жылу өткізгіштігі максималды мүмкін болатын, және ереже бойынша, 100 Вт/мК-нен асатын болуы тиіс. Графиттің (көміртегінің) кері қасиеті оның жоғары химиялық белсенділігі және сутегімен ұшқыш қоспалар түзуі. Бұл термоядролық плазманың айтарлықтай ластануына және қондырғының жұмысының үзілістеріне алып келеді. Сутегі атомдарының әсерімен көміртегінің химиялық эрозиясын азайту үшін жылу өткізгіштіктің күшті төмендеуіне алып келмейтін мөлшерде үнемдеп легирлеу (В, Si, Ti және т.б.) қолданылады, алайда бұл шаралар да жағдайды әрқашан жақсартып бермейді. Графиттің дәл осы сипаттамалары ХЭТР -де, энергетикалық термоядролық реакторлардың прототипінде дивертор материалы ретінде вольфрамның таңдалуына алып келді.

Осыған байланысты диссертациялық жұмыста негізгі зерттеу вольфрам үшін жасалды. Соның ішінде зерттеу үшін PlanseeAG фирмасының DFW – double for get high purity tungsten маркалы вольфрамы таңдалып алынды, ол ХЭТР диверторының пластиналарын дайындау үшін негізгі үміткерлердің бірі ретінде қарастырылады. Жасалған әдеби шолулардан вольфрамды дивертор ретінде қолданудың негізгі шектеуші факторларының келесідей түрлері болатыны келіп шығады:

- вольфрамды тозаңдату, термоядролық плазманың ластану факторы ретінде,
- энергияның импульсті бөлінуі (плазманың үзілуі, ЭЛМ-дар) кезінде вольфрамның балқуына алып келетін жылулық эрозия да плазманың ластануы мен механикалық қасиеттерінің деградациясына алып келеді;
- вольфрамда гелийдің жинақталуы, беттің құрылымының деградациясына (блистеринг. қабыршақтану) және механикалық қасиеттерінің өзгеруіне, сынғыштануға алып келеді.

Осыдан келіп зерттеу міндеттері тұжырымдалды:

- DFW вольфрамның тозаңдану коэффициентін экспериментте анықтау;
- бетке энергия импульсті бөлінген кездегі массаның шығының анықтап, DFW вольфрам және графиттің жылулық эрозия эффекттерінің зерттеу;
- гелиймен және сутегімен сәулелендірудің беттің құрылымына әсерін (блистерлердің қалыптасуы және қабыршақтану) және механикалық қасиеттерінің өзгеруін зерттеу.

Осы міндеттерге сай жабдықтар мен зерттеу әдістері таңдалып алынды, олардың бір бөлігін қойылған міндетті шешу үшін бейімдеу қажет болды. Әдеби деректерге шолу жасау негізінде сәулелендіретін бөлшектердің түрі мен энергиялары да таңдалды. Әдебиетте вольфрамға 10-20 кэВ энергиялы гелий иондарының әсерлерін зерттеу нәтижелері жеткілікті түрде көп келтірілген. Біз гелий иондарының энергияларының 40-45 кэВ аралығын таңдап алдық, өйткені осындай энергиялы гелий иондарының вольфрамның құрылымы мен қасиеттеріне әсер етуі бойынша эксперименттік деректер әдебиеттерде іс жүзінде жоқ дерлік.

Диссертациялық жұмыста зерттеуге арналған екінші материал ретінде АРВ таңбалы реакторлық графит таңдалды. Графит үшін оның құрылымы мен қасиеттеріне гелий және сутегі иондарымен сәулелендірудің әсерін зерттеу бойынша көптеген зерттеулер жасалғандығымен байланысты диссертациялық жұмыстың міндеттері :

- плазманың импульсті ағынымен сәулелендіргендегі массаның шығынын зерттеу

- 100 кэВ энергиялы аргон иондарымен сәулелендіргендегі тозаңдану эффектілерін зерттеу болды.

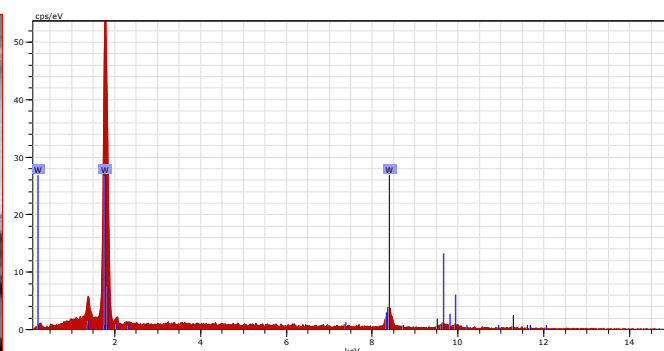
## 2 ЗЕРТТЕУ ӘДІСТЕРІ ЖӘНЕ ЭКСПЕРИМЕНТТІК ҚҰРЫЛҒЫЛАР-МЕН МАТЕРИАЛДАР

### 2.1 Құрылымы мен қасиеттерін зерттеу әдістері

Бірінші қабырғаны қорғауға арналған материалдардың құрылымы мен қасиеттерін зерттеу үшін келесі стандартты зерттеу әдістері мен жабдықтары пайдаланылды. Беттік морфологиясын, блистерингті және флекингті зерттеу үшін Oxford Instruments (2.1 (а) суретте келтірілген) Энергетикалық Дисперсті Рентгендік Микроанализ Жүйесімен (EDRA) жабдықталған JeolJSM-7500 FA электронды микроскопында жоғары ажыратымдылықты сканерлеудің электрондық микроскопиясы (СЭМ) пайдаланылды.



а



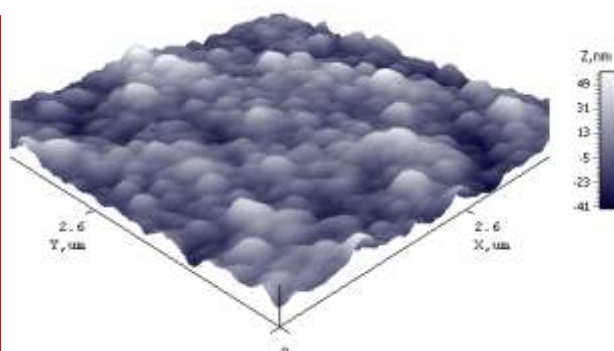
б

Сурет 2.1 а - Сканерлеуші электрондық микроскопиясы JeolJSM-7500 FA а-микроанализ жүйесімен жабдықталған; б- жоғары тазалығы вольфрам DFW үлгісінің элементтік құрамын анықтау нәтижесі

Беттік құрылымын зерттеуге көмекші әдіс ретінде AIST-NT маркалы атомдық күштік микроскопы (AFM) 2.2 суретте келтірілген.



а



б

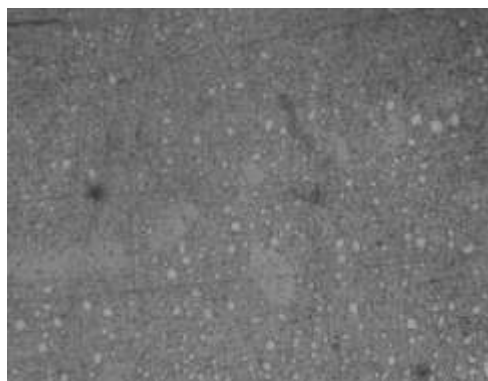
Сурет 2.2 а - Атомдық куш микроскопиясы AIST-NT; б - 45 кэВ энергиялы альфа-бөлшектерімен сәулеленген, молибденнің беттік көрінісі



Беттік құрылымын бастапқы бағалау және зерттеуге арналған үлгілерді дайындау үшін Axio Observer Alm оптикалық микроскопы, 2.3-ші суретте келтірілген.



а



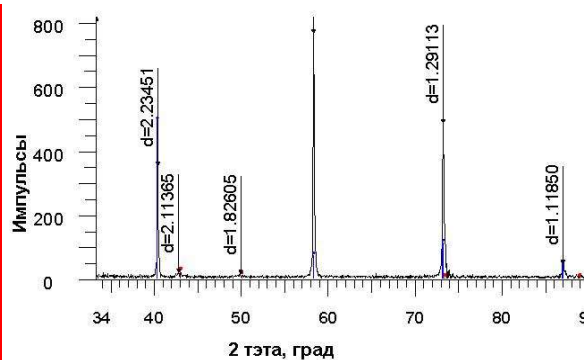
б

Сурет 2.3 а - Металлографиялық микроскоп Axio Observer; б - 45 кэВ энергиялы альфа-бөлшектерімен сәулеленген, вольфрамның беттік көрінісі

Үлгілердің фазалық құрамын анықтау Брега-Брентано зерттеу геометриясында дифракцияланған шоқтағы монохроматқышпен мыс сәулеленуін пайдаланатын BRUKER маркалы D8 ADVANCE рентгендік дифрактометрінде жүргізілді. Келесі түсірілім режимдерді пайдалана отырып рентгенқұрылымдық анализдер жасалынды: Ағымда 40 мА рентген түтіктің кернеуі 40 кВ, сканерлік бұрыштың қадамы  $2\theta - 0.02^\circ$ , әр қадамындағы қойылған уақыты 1.0 с. Бұл геометриядағы рентгендік дифрактометриялық әдіс материалдағы рентгендік кванттардың ауқымымен анықталатын, беттік құрылымы  $\sim 7-10$  мкм тереңдікте туралы орташа ақпаратты береді.



а



б

Сурет 2.4 а - D8 ADVANCE дифрактометрі; б – вольфрамның сәулеленбеген диффрактограммасы

Механикалық қасиеттерін анықтау үшін, бізге қаттылықты РМТ-3М өлшеу құрылғысымен, микроағылдықты және сканерденетін наноқұрылымды өлшеуіші «Наноскан Компакт» құрылғысы арқылы жүргізілді. Күш пен



төзімділікті сынау Loyd Instruments LR5K Plus маркалы компаниясының әмбебап сынау машинасында жүргізілді. Зерттеуге үлгіліні дайындық сынамалар үшін, керекті үлгілердің қалаған пішінімен мөлшерін жасау үшін электрлі кешкіш құрылғысын пайдала отырып сынамаларды мұқият тазалауға арналған тегістеу және жылтырату машиналары берілген әр түрлі зығыр қағазымен үйкелеп үлгінің беттік қабаттарын дайындалды, электрлік ұшқынды кесу машинасын және жылтыратып беттік қабатын алу үшін электрлі құрылғылармен үлгілерді осылайша өңдеулер жүргізілді. Тозандану коэффициентінің экспериментальды өлшемі үшін, арнайы үлгілер тағайындалды екі қабаттан тұратын құрылымы – материалмен төсеніш қабаты қапталған, осылайша тозандану коэффициенті анықталады. Зерттелетін материалдардың қабатымен қапталып тозандану әдісі мынадай магнетронды жабын жасалынатын құрылғы қолданылды [61,62,б.36]. Осындай қондырғының көрінісі 2.5 а - суретте көрсетілген. Үлгіні магнетронды тозандану мақсатымен туындайтын зерттеу үлгісі 2.5 б-суретінде схематикалық түрде көрсетілген. Үлгілерді металл жабындармен дайындау үшін ион-плазмалық қондырғы жаңартылды ( 2.5 б а- суретте көрсетілген), осы жаңартылған түрі вакуумдық жүйені, газ қоспасын беру жүйесін, магнетронды тұндыру жүйесін және үлгілік тасымалдау жүйесін қамтиды. Вакуумдық жүйе жұмыс камерасының базалық вакуумды  $3 \times 10^{-4}$  Па соруын қамтамасыз етеді. Металдарды синтездеуге арналған қондырғының маңызды элементі - дайындау жүйесі және камераға газдың енуі, өйткені синтезделген жабынды сапасы газ қоспасының сапасына тікелей байланысты, ішін толық тзаламаса жабынды дұрыс көрсетілмеуі мүмкін зерделеніп жатқан үлгілеріміздің дұрыс нәтиже алу үшін. Газ қоспасын беру жүйесі газдың жұмыс камерасына газды енгізу құрылғысын қамтиды, қоспалардан газ қоспасын тазалау жүйесі және жұмыс камерасына газдың енуіне арналған құрылғыны мұқият қарағанымыз жөн. Магнетронды тұндыру жүйесі жұмыс камерасының бүйір қабырғаларында орналасқан төрт магнитті магнетронды және магнетронды үздіксіз қуат көзінен тұрады. Магнетрон катодты нысанадан, анодты және магнитті жүйеден тұрады.

Тозандану коэффициентін өлшеу үшін нысана ретінде металлды пайдаланылады. Біз магнетронды анодтарды, корпусты және қозғалатын құрылғыны қамтитын аралас анодтары бар тізбекті таңдадық. Жалпы анодпен жасалған схема осы қосылу схемасымен магнетронның жұмыс режимінің тұрақтылығы артуына байланысты таңдалады, ион ағыны төсініште азайтылады және жүктеме тізбегінің конфигурациясына қарамастан, магнетронды қуат көзінен іс жүзінде барлық ток мақсатты түрде нысанадан өтеді, сондықтан барлық кіріс қуаты мақсатты тозандану материалындағы нысанаға жұмсалады. Мұның бәрі шығарылғанда аздалған жүктемелермен магнетронды тұрақты жұмысын қамтамасыз етеді. Үлгілік тасымалдау жүйесі вакуумдық конструкцияның қадамдық қозғалтқышын қамтиды, ол жұмыс камерасында орналасқан оған үлгілер орналастырылған барабандарды айналдырып бұрады, Айналу жылдамдығы 1 айналу / минуттан 30 айналу / минуттар аралығында өзгеруі мүмкін (сонымен бірге өлшемі 15 мм × 15 мм болатын 20 үлгіні

дайындауға болады). Осы барлық магнетрондар бір жазықтықта орналасқандықтан, жұмыс камерасының өсіне перпендикуляр ал үлгілер жазықтықта айналады, сонымен қатар камера өсіне перпендикуляр, содан кейін әрбір үлгі айналғанда магнетронды метал бар плазма ағыны жаны арқылы өтіп осы магнетронға қолданылатын қуатқа байланысты нанометрдің қалыңдығының бірдей беттік қабаты жағылады. Синтезделген қабаттың қалыңдығы жабынның тұндыру уақытымен есептелді және протондарда немесе азот иондарында Резерфорд кері шашырау әдісімен жабудың қалыңдығын анықтау арқылы бақыланды.



а

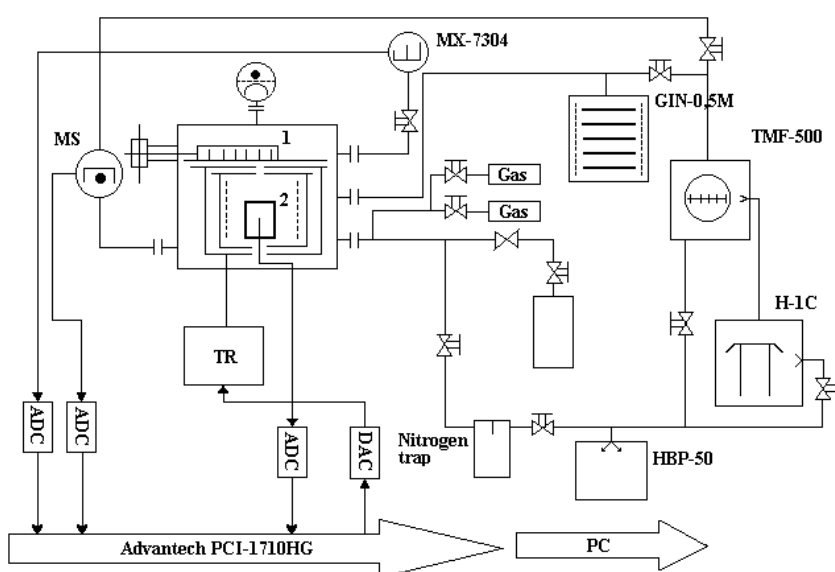


б

а -қондырғы, б - үлгіні магнетронды тозаңдандыруға құрылған зерттеулер.

Сурет 2.5 - Металл жабындыларының магнетрондық тұндыруына арналған қондырғы

Альфа бөлшектерімен вольфрамды сәулелендіру кезінде гелийдің жиналуын зерттеу үшін біз термиялық десорбциялық спектроскопия әдісін қолдандық. Бұл әдіс сәулелендірілген металдардағы газ қоспаларының жинақталуын және формаларын зерттеу үшін кеңінен қолданылады [66 -70]. Қатты денелердегі газдардың термодесорбциялауға зерттеуге арналған қондырғының схема диаграммасы 2.6-суретте келтірілген және келесі түйіндерден тұрады: жұмыс камерасының, сорушы жүйелерінен, бақлаушы, өлшеу және басқарушыдан тұрады. Газдарды дисорбциялау тіркеуі MX-7304 радиожиілік салмақ-спектрометрмен жүзеге асырылады. Автоматтанған құрылғы компьютерге жалғанған жан-жақты құрылғы моделі Advantech PCI-1710HG.



1 – үлгіге арналған ұяшық, 2 – жылыту құрылғысы, MX-7304 радиожиілік салмақ-спектрометрмен, MS – статическалық салмақ-спектрометрі, GIN-0,5 – гетероионды сорғы, H1-C – турбо-молекулалық сорғы, HBP-5D – алдын- ала соруға арналған сорғыш, TR – температураны реттегіш, PC – арнайы компьютер

Сурет 2.6 - жылудезорбциясын зерттеуге арналған қондырғының схема диаграммасы

ТДС қондырғының негізге сипаттамалары :

- Камерадағы жұмыс вакуумы  $10^{-8}$  мм рт ст қарағанда нашар емес.;
- 20-1200°C интервалында, үлгідегі қыздыру жылдамдығы 42°C/мин;
- эксперимент барысында кез-келген массаны тіркеуге болады; бірдей уақытта 6 – ты салмақты тіркеуге болады ;
- зерттеуші үлгілердің өлшемдері  $3 \times 3 \times 1$  мм аспауы қажет;
- әр түрлі режимдерде - интегралдық, дифференциалды және аралық деңгейде жылулық дезорбция экспериментін жүргізу.

## 2.2 Иондар сәулелерімен, импульстік электрондармен және плазмамен сәулелендіруге арналған жабдықтар және әдістер

ДЦ-60 Циклотроны Ядролық физика институтының Астана қаласындағы бөлімшесінде орналасқан.

Альфа бөлшектерімен үлгілерді сәулелендіру бойынша негізгі жалпы жұмыстар ауыр иондық үдеткіштің төменгі энергиялы арнасында орындалды, 2006 жылы пайдалануға енгізілген, 2.6-ші суретте көрсетілген.



Сурет 2.7 - ДЦ-60 ауыр иондар үдеткіші

ДЦ-60 үдеткіш кешені газды иондарды екі режимде мүмкіндік береді бірінші төмен энергиямен қамтамасыз етуі (2.7 суретте көк белгімен бейнеленгендей ЭЦР көзінің каналы көрсетілген) екіншісі жоғарғы энергиямен қамтамасыз етеді. Төмен энергиялық арнасы иондардың зарядының 20-25 кэВ энергиясымен иондарды жылдамдатуға мүмкіндік береді. Сондықтан екі еселенген гелий иондары ионның жалпы энергиясын 40-тан 50 кэВ-ке дейін болуы мүмкін.

Вольфрамның құрылымы мен қасиеттеріне гелийдің әсер етуін зерттеу үшін 22,5 кэВ энергиямен бірге гелия иондарының (альфа бөлшектерімен) екі еселенген зарядты пайдаланылды, яғни, альфа-бөлшектердің энергиясы 45 кэВ болды. Вольфрам және графиттің беткі қабатын тозандандыруға арналған эксперименттер төмен энергиялы арнада бес зарядты аргон ионымен жүргізілді, зарядына 20 кэВ энергиялы және толық ион энергиясы 100 кэВ.

Жоғары температура (600 ° С-қа дейін) сәулелендіру үшін электрқызырғышымен мишенұстағыш пайдаланылды, 2.8-суретті

бейнеленген. Электроқыздырғыш мишенұстағыш құрылғы келесі техникалық параметрлерге ие:

- Қыздыру элементінің кернеуі 40 В –қа дейін;
- қыздыру элементінің ағымы 4 А дейін;
- қыздыру элементінің қуаты 160 Вт-қа дейін
- Сәулелендірілген үлгідегі температураны өлшеу үшін 600 ° С дейін өлшенген температура диапазоны бар термопары пайдаланылады.



Сурет 2.8 – (Солжағындағы)мишен ұстағыш, электрқыздырғышымен

ДЦ-60 үдеткішінде  $10^{18}$  ионов/см<sup>2</sup> флюенсінде төменгіэнергиялы He, Ar, Xe иондармен үлгілерді сәулелендіруіне термопара және мишенұстағыш қыздыратын құралдары пайдаланады. Вакуумда сәулелендіруге мишендік камерасында 600 °С температураға дейінғана жететіні көрсетілген.

Қайтазарядталған кешенді үдеткіш УКП-2-1.

УКП-2-1 үдеткіші Ядролық физика институтында орналасқан, 400 кэВ-тен 2 МэВ-ға дейінгі энергиясымен уранға сутегі иондарын жылдамдатуға мүмкіндік береді [71]. Үдеткіштің бейнесі 2.9 суретте келтірілген. Осы үдеткіште келесідей жұмыстар атқарылды:

- 1 МэВ энергиялы протонмен вольфрам үлгілерін сәулелендірілді;
- Резерфордтық кері шашырау әдісімен тозаңдалған қалыңдығын өлшеу.

РОР әдісімен жабындылардың қалыңдығын және элементтік құрамын өлшеу әдістемесі осы үдеткіште әзірленген және енгізілген [72].





Сурет 2.9 - УКП-2-1 үдеткіші

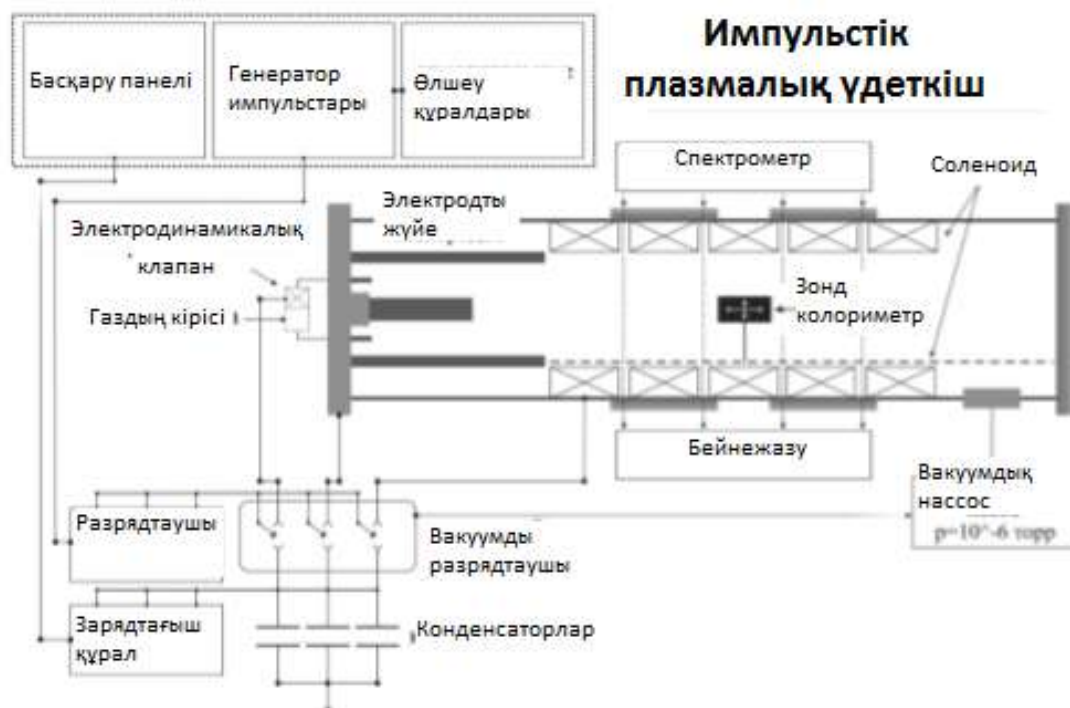
ИПУ-30 Импульсті плазмалық үдеткіш.

Импульстік плазмалық ИПУ-30 үдеткіші экспериментальдық құрылғысы НИИЭТФ аль-Фараби атындағы ҚазҰУ –да орналасқан. Үлгілерді импульстік плазма ағындарымен сәулелендіруі 2.10-суретте бейнеленген.



Сурет 2.10 - ИПУ-30 Импульстік плазмалық үдеткіш

Үдеткіш үш негізгі бөліктен тұрады: (Электрарасындағы кеңістікке разрядттық кернеуі берілген кезде плазма пайда болады) вакуумдық жүйе және жүйе конденсаторы (электр өрісінің энергиясын жоғары вольтты қуат көзінен жинақтау үшін) [73,74]. Қондырғының схемасы 2.11 суретте келтірілген.



Сурет 2.11 - ИПУ-30 Импульстік плазма удеткішінің схемасы.

ИПУ-30 удеткішінде графит үлгілерін импульстік плазма ағындарымен сәулелендіру жұмыстары жүргізілді. Плазмаға айналу газ ретінде сумен аргон пайдаланылды, конденсатор батареясының зарядтау кернеуі ( $C=100$  мкФ) удеткіште 3 тен 14 кВ –ке дейін зарядталған. Бір импульстегі энергия  $10 \text{ Дж} \cdot \text{см}^{-2}$  ал импульс ұзақтығы 2.5 мкс, графит үлгілеріндегі импульстің саны 8 ден 13 құрады.

### 2.3 Зерттеуге арналған үлгілер

Бұл жұмыста жоғары сапалы вольфрам үлгісі және АРВ маркалы реакторлық графитінің үлгілері дайындалды, ал алынған нәтижелерді әдеби деректермен салыстырып, зерттеу әдістерін жасау үшін жоғары тазалықтағы молибден таңдап алынды.

Импульстік энергияны беттік және төмен энергиялық иондар сәулеленуіне шығаратын әсерлерді зерттеу үшін бізге құрамы таза вольфрам үлгілері дайындалды DFW (double forget tungsten grade 99.97 салмағы.%, Plansee AG, Австрия фирмасындағы), вольфрам токамак диверторының пластинасын қорғауға арналған келешекті материалдардың бірі болып табылады.

Иондық сәулеленудің және импульстік энергияның бөлінуін графит құрылымы мен қасиеттеріне әсері әлдеқайда аз зерттелген. Өйткені бұл кезеңде графит ТЯР-ның бірінші қабырғасына арналған пластинасының материалы ретінде қарастырылмайды.

Біз құрамы таза 99.96 сал.% молибден үлгіні дайындап салыстырмалы түрде әдістерге сынау үшін алынды, сәулелендіру және импульстік энергия

бөлінуі және иондармен сәулелендіру арқылы енгізілген оның құрылымы мен қасиеттеріндегі өзгерістерді зерттеу әдістерін сынау үшін материал ретінде таңдалған.

## **2.4 Жылу эрозиясының әсерін зерделеп үлгіні зерттеуге дайындау, гилидің жинақталуы және блистерлердің пайда болуы**

Үлгі дайындау - зерттеудің маңызды бір бөлігі және бірнеше кезеңнен тұрады: тегістеу және жылтырату. Тегістеу үлкен бір жұмысты талап етеді, беттік қалыңдығын тегістей отырып құрлымының өзгергенін байқаймыз. Не құрылым беттінің жылтырап түсуі зерттеуімізге оң әсерін береді. Оптикалық микроскоп арқылы құрамын қарап тексеріп көруіміз керек осылай зерделеуімізге дейін дайындаймыз. Металл үлгілерін дайындау процедураларын бізбен молибденде және оның нәтижелерінде жасалды, осы сатылардың маңыздылығын көрсететін төменде келтірілген [60,б.36;75].

Әдетте ереже бойынша, бірінші кезең - өрескел (грубая) тегістеу. Бұл тегістеу қадамының міндеті үлгіні кесу кезіндегі тура шықпағанның, бүлінген материалды жою болып табылады, материалдың нақты құрылымын алу үшін үлгілік қызықты аймағын таңдап алып бетті теңестіру және түзулеу. Көп жағдайда кремний карбидін (SiC) металлографиялық абразивтік ретінде пайдаланылады. Бұл тегістеу үшін мінсіз абразивті шығару үшін оңай шаруа емес, себебі ол жоғары қаттылық пен өткір қырлы жиектерге ие. Тегістеу үшін өте өрескел үлкен зернолық қағазбен үйкелеу арқылы бұзылуларды толығымен жою үшін абразивті (250-ден 100-ге дейінгі микрондармен түйіршікті зернолық қағазбен) басталады, абразивтік мұқабалар, бөртпелерден мұраланған бұзушылықтарды жоюды аяқтау. Бұдан кейін ұсақ зернисті қадамы қолданылады, дегенмен, беткі қабаттылықтың кедр бұдырлығын азайту үшін көбірек түйіршікті абразивті кіші зернолық қағазға көшу. Бір абразивті қағаз нөмірінен екіншісіне ауысқанда, үлгіні абразивті түрде механикалық түрде тазалау керек және алдыңғы қағаздағы қозғалыс бағытына 90°-қа бұрылған болуы керек. Осылайша қағаздарды ауыстырып тазалап градусқа бұру арқылы үйкеліс арқылы беттік қабаттың жылтырауына әкеледі. Алдыңғы қағазда жасалған сызаттардың толық жойылғаннан кейін пайдаланылған қағаздың түптеріне тегістеу. Металлографиялық үлгілерді дайындау үшін кремний карбиді абразивтік жабынды абразивтік қағаздың құрамында 60 (өрескелден) бастап 1200 (кішкене зерностікке дейін) мөлшерімен азайтып, ол алдыңғы кезеңдерде алынған зақымдарды, бетке түскен сызаттарды толығымен жоюға тиіс.

### *Жалтырату*

Ұзақ тегістеудің кезеңінде алынған деформацияларды жою және жоғары шағылыстырумен бет алу үшін үлгілерді одан әрі зерттеулерге дейін жылтыратылуы керек. Толықтай сызатты жойып алып тастау үшін бізге электірлі жылтыратулар керек. Зерделеуге дейінгі тегістеулер және жылтырату арқылы дайындаулар. Жылтырату - сапа сияқты факторларды ескеру керек болатын әрекеттер кешені, тұрақтылық пен жылтыратуға арналған матаны,

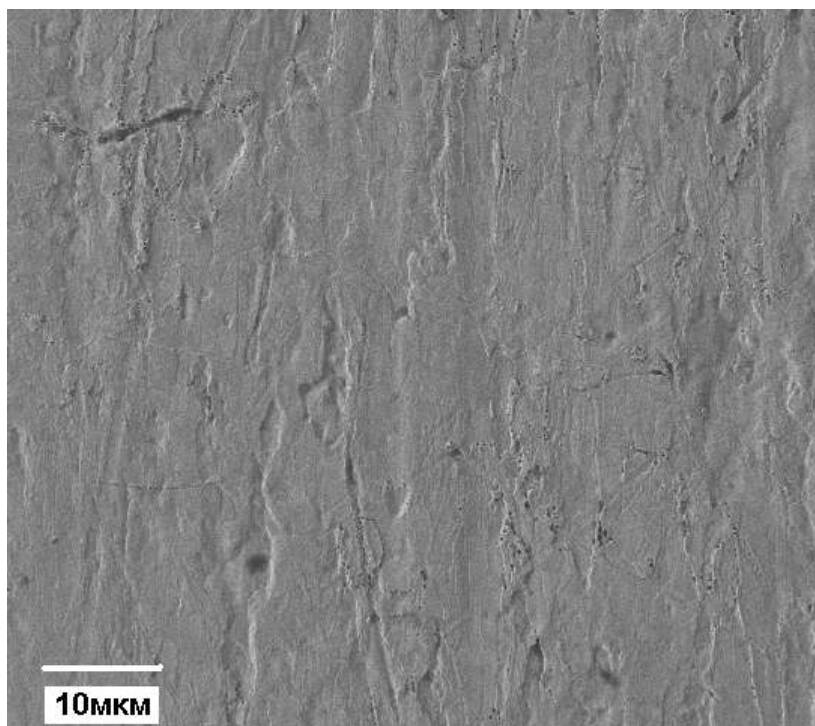


абразивтерді, жылтырату кезіндегі қысымды, процестің жылдамдығын және ұзақтығын дұрыс таңдау. Жіңішке тегістеу кезеңінде алынған деформацияларды жою үшін полировка қажет. Осылайша, бізге берілген үлгілерді әр түрлі зернолық қағазбен бетін тегістеп, оны арнайы абразивті матаны пайдалана отырып жылтыратып үлгілердің беттік құрылымын дайындадық.

*Төмен энергиялы альфа - бөлшектермен сәулелендірілген молибдендегі гелийдің жинақталуы және үлгінің құрылымымен беттің дайындау*

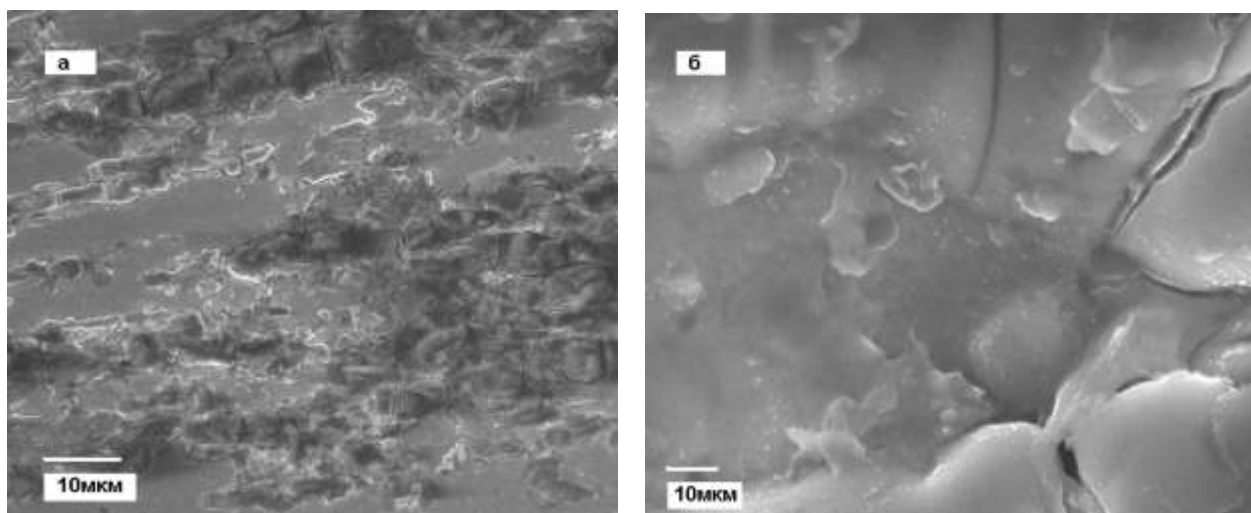
Біз бетінің сапасына бет құрылымына әсерін және молибдендегі гелийдің жиналуына әсерін зерттедік. Ол үшін біздің мақсатымызбен дайындау дәрежесіндегі айырмашылығы молибден үлгілерінің екі түрін таңдадық, беттік дайындау деңгейінен ерекшеленіп, біздің ойымыздағыдай шығуна байланысты. Молибден таңдаған себебіміз, біздің мақсатымыз вольфраммен графитті салыстырмағымыз келді. Молибден үлгісі 1-ші типтегі өлшемдері 20 мм × 2 мм қалыңдығы ~ 1 мм болатын пластин дайындалды. 2 типті молибден үлгісі 250 мкм қалыңдығы және ауданы 10 мм × 10 мм болатын пластиналар, жарты ыстық деформация әдісімен алынған фольгадан кесілген. Молибденнің кристалдық құрылымы жеткілікті жоғары деңгейдегі жетілдірілген ОЦК торымен бейнеленген, ал тордың тұрақты мәні  $a_{Mo} = 0.3148$  нм құрайды.

Үлгілердің негізгі айырмашылығы - бетінің тегістелуінде және жылтыратудан кейінгі бетінің үлгілері - 1-ші типті үлгілер, 2.12 -суреттен көріп отырғанымыздай, беті жеткілікті тегіс, материалға еніп кетпейтін жарық сызаттар байқалмайды.



Сурет 2.12 - Бірінші типті үлгідегі молибден бетінің СЭМ құрылғысымен алынған бейнесі

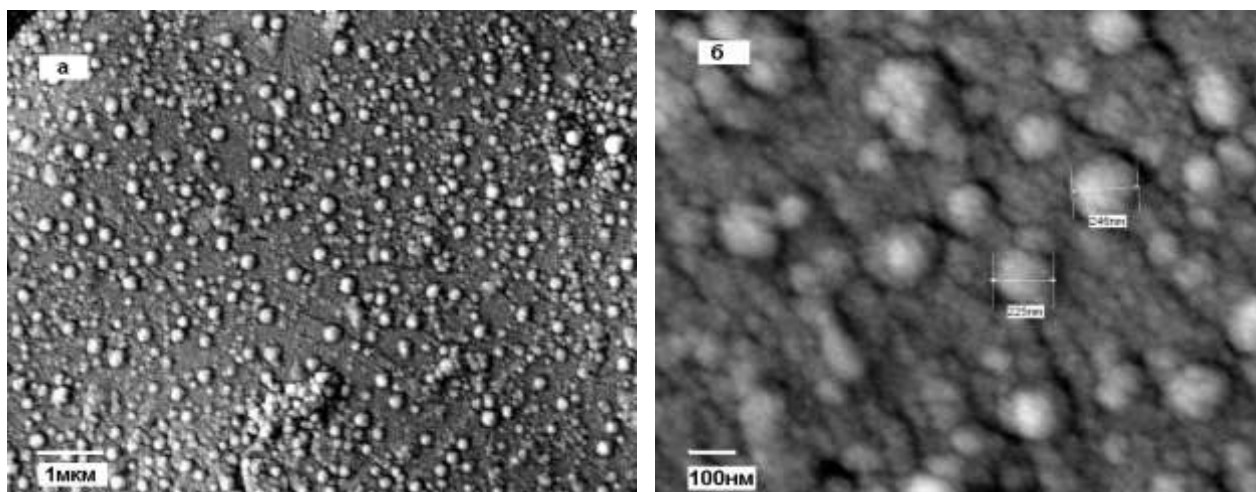
Екінші типтегі үлгілердің беті тегістеліп қағаздармен үйкелмеген және жылтыратылмаған бірақ сонда да, олардың бетінің құрылымы илеуден кейін тікелей пайда болған бейнеі 2.13 суретте көрсетілгендей. түрлі үлкейткішпен жасалынған, дайын емес молибден үлгісінің сынамасының беткі қабатында терең енген сызаттардың болуымен сипатталады. Екінші типті молибден құрылымының екінші ерекшелігі әртүрлі зернолар мөлшерінің айырмашылығы - үлкен зерна бірге шамамен  $\sim 100$  мкм мөлшерінде, ұсақ түйірлер  $\sim$  бірнеше микрометрлер байқалады.



а –  $\times 1000$ , б –  $\times 30\,000$

Сурет 2.13 - Молибден үлгі бетінің СЭМ түсірілім бойынша екінші типтегі әртүрлі ұлғайтуында түсірілген бейнесі;

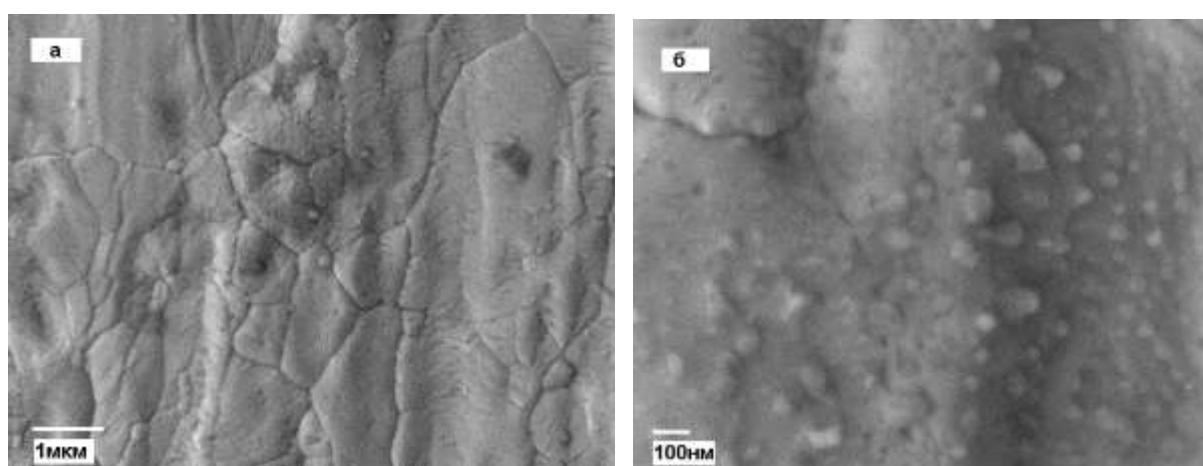
А1-суретте көрсетілген схемаға сәйкес, ДЦ-60 үдеткіші төмен энергиялы каналда  $1 \times 10^{18} \text{ см}^{-2}$  флюенсіне дейін 45 кэВ энергиясымен альфа-бөлшектермен бірінші және екінші типтегі молибден үлгілерін сәулелендіру жүргізілді. Бірінші типті үлгідегі молибден сәулелендірілген беттік құрылымын зерттеу нәтижелері 2.14-суретте ұсынылған.



а –  $\times 10\,000$  ұлғайтқышында, б –  $\times 45\,000$

Сурет 2.14 - Альфа-бөлшектермен сәулелендірілген  $1 \times 10^{18} \text{ см}^{-2}$  флюенсіне дейін 45 кэВ энергиясымен бірінші типті молибден үлгісінің беткі қабаты, әртүрлі СЭМ ұлғайтуында түсірілген

2.12 және 2.13 суретте көрсетілген бірінші типті молибден үлгісі бетінің суреттерін салыстырғандағы, көретініміз альфа-бөлшектермен сәулелену 250 нм-ге дейінгі сфералық түзілімдердің бетіне шығуы, ол түзілімдер блистерлердің пайда болғанын білдіреді, әзірге үлгінің бетінен гелия толтырылған көпіршіктердің іздері. Сондықтан альфа бөлшектерімен сәулеленгендегі гелий көпіршіктерінің пайда болуына әкелетінін, яғни, блистер бөртпелердің пайда болатынын аңғарамыз. Сканерден өтетін электрондық микроскопты пайдалана отырып, сәулелендірілген молибденнің екінші типті үлгілерінің беткі құрылымын зерттеу толығымен басқа сурет береді, 2.15-суретті көріп отырғанымыздай.

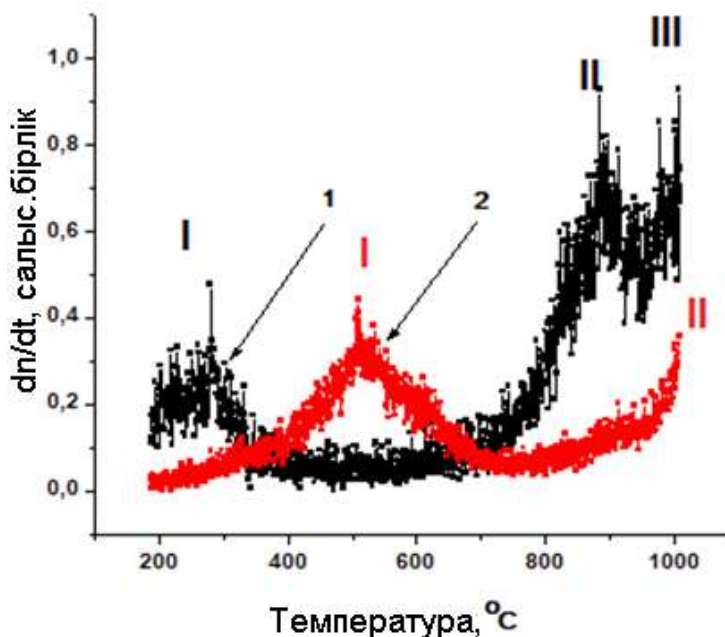


а –  $\times 10\,000$  ұлғайту, б -  $\times 35\,000$

Сурет 2.15 - Альфа-бөлшектермен сәулелендірілген  $1 \times 10^{18} \text{ см}^{-2}$  флюенсіне дейін 45 кэВ энергиясымен, екінші типті молибденді СЭМ-нің әртүрлі ұлғайту арқылы жасалған бетінің бейнесі

Екінші типтегі сәулеленбеген молибден үлгісінің бетін суреттерін салыстыру және бірдей жағдайда сәулелендірілген және бірінші типті молибден үлгісінің біркелкі пішінін көргенге дейін, альфа-бөлшектермен сәулеленуден кейін осы үлгілердің беткі құрылымы түбегейлі ерекшеленетінін көрсетеді. Екінші типті молибден үлгісінің сәулеленген бетінде шығыңқы түрі көрінбейді, бірінші типті (2.14, а суретінде) молибденнің сипаттамалары блистерлер жоқ. Үлкен, жарықтарсыз түйіршіктердің тек қана 2.13 суреттегі қабыршақтарымен салыстырғанда әлдеқайда кіші өлшемдердегі сфералық өрнектерді көре аламыз. Мұны былай түсіндіреміз. Жарықтар - имплантацияланған гелий атомдары үшін тиімді ағымдары бар және альфа бөлшектерімен сәулелену процесінде имплантацияланған гелия жарықтарға көшеді, беттік десорбциясы жарықтар материалға жиналмайды. Тек қана ірі зернолары көрініп, жарықсыз гелий газбен толтырылған көпіршіктерде жиналады, бұл бейнені 2.14,б суреттен көруге болады.

Осы позицияны растау үшін термиялық десорбция спектроскопия әдісімен бірінші және екінші типті молибден үлгілеріндегі гелийдің жиналуын зерттеу жүргізілді. Молибденнің үлгісі вакуумдық камераға орналастырылып, бөлме температурасынан  $1000^{\circ}\text{C}$ -қа дейін минутына  $42^{\circ}\text{C}$  жылдамдықпен қызады, бірдей регистрация санын сол мезгілде масс-спектрометрия көмегімен десорбирленген гелия көлемін есепке алады. Зерттеу нәтижелері 2.16 суретінде келтірілген, молибден үлгісінен гелидің шығу спектрі бірінші тип бойынша екінші қыйсық жіне екінші тип бойынша бірінші қыйсық белгілермен белгіленген. молибден бірінші типіндегі гелийдің термодесорбциясының спектрі екі шыңымен көрсетілген (сурет 2.16 көрсетілген).



1 – фольга қалыңдығы 250 мкм, 2 – жылтыратылған молибденнің қалыңдығы 1 см.

Сурет 2.16 - Молибден гелиясының термодесорбция спектрі, сәулелену флюенсі  $10^{18}\text{ см}^{-2}$

Төмен температура бір шыңы гелий атомдарының жылжымалы кешендерінен гелийдің кірістілігі ретінде түсіндіріледі және беткі қабатында блистерлердің шығуы. Жылыту алдында, бетіне газ көпіршіктері ашылмағаны байқалмайды. Жоғары температура II-ші шыңы комплекстерден гелийді босатумен және гелий атомдарының молибденнің терең қабаттарынан жылжымалы комплекстерді шығарумен байланысты. Суреттен байқауға болады екінші типті молибденнің үлгісінен дайындалмаған жылтырамаған бетінен гелидін шығуы байқалады. Гелий десорбциясы төменгі температурадағы пикі жок  $\sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ , жоғарғы температура аймағында байқалады  $> 900\text{ }^{\circ}\text{C}$ , сурет 2.15, қыйсық 1-мен кескінделген. Осы зерттеулердің нәтижесі - имплантацияланған гелийдің материалдарға жинақталуының дұрыс зерттеуі үшін оның беті мұқият дайындалуы керек.

### 3 DFW ВОЛЬФРАМЫНЫҢ ҚҰРЫЛЫМЫ МЕН ФИЗИКА-МЕХАНИКАЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІНЕ ПЛАЗМА ЖӘНЕ ЗАРЯДТАЛҒАН БӨЛШЕКТЕР АҒЫНДАРЫМЕН СӘУЛЕЛЕНДІРУДІҢ ЫҚПАЛЫН КЕШЕНДІ ЗЕРТТЕУ

#### 3.1 Ауыр иондардың әсерімен тазалығы жоғары вольфрамның тозаңдалу эффекттерінің зерттеуі

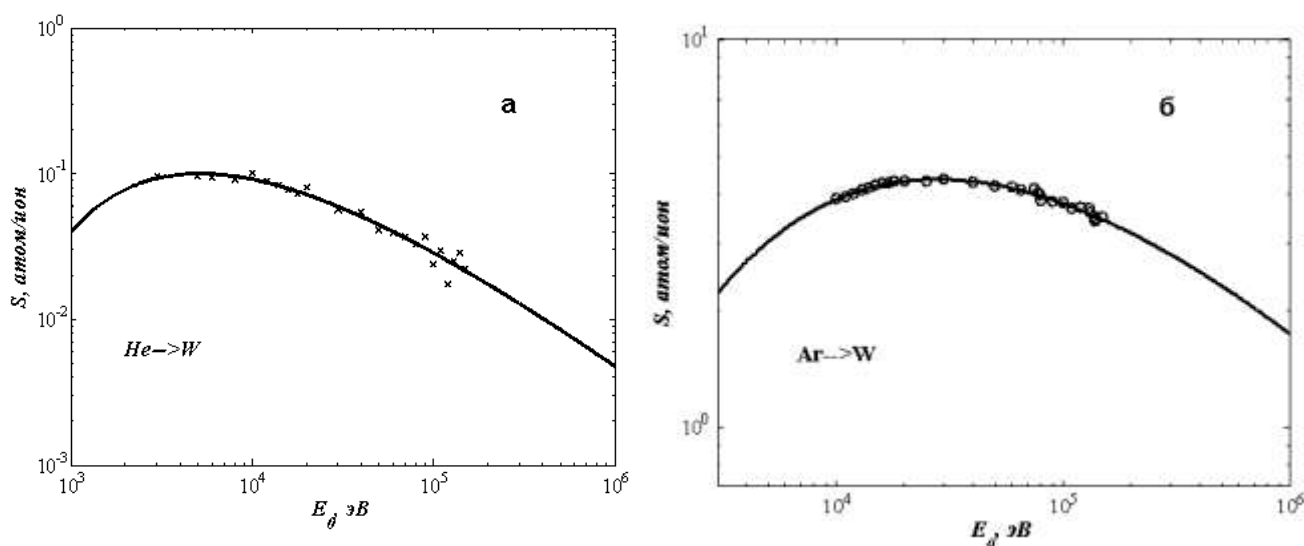
Компьютерлік модельдеу әдісі арқылы вольфрамның тозаңдалу коэффициентін есептеу.

Осы зерттеу жұмысында тозаңдалу коэффициенттері жұптық соқтығысу моделіне негізделген SRIM программалық пакетін пайдаланып, атомдық ығысулардың каскадтарын Монте Карло әдісімен компьютерлік модельдеу арқылы есептелген. Кіріс параметрлері ретінде онда иондардың түрі және энергияларының шамасы (10 эВ - 2 ГэВ ауқымында) пайдаланылады.

Тозаңдалу коэффициентінің шамасына едәуір ықпал ететін бет үстіне жақын байланыс энергиясының мәні  $W$  сублимация энергиясына тең болып алынды. Модельдеу кезінде соқтығысулар каскадының дамуы кездейсоқ процесс ретінде қарастырылатындықтан, түпкі нәтиже (модельденген каскадтардың)  $N$  сынақтар санына байланысты болады.  $N$  артқан сайын нәтиженің дәлдігі де артады, алайда есептеу жүргізу уақыты көбейеді. Сондықтан, оңтайлы мәнді таңдау үшін әртүрлі  $N$  кезінде бірқатар тестілік есептеулер жүргізілді, соңында  $N = 10000$  таңдап алынды ( $N = 10000$  болғанда нәтижелерден орташа ауытқуы 12%-дан аспады). Атомдық каскадтардың тозаңдалуына алып келетін даму процесіне негізгі үлес қосатын материалдың бет үстіне жақын қабаттары болғанымен, каскадтар қамтитын бүкіл аймақты қарастырған кезде неғұрлым нақтылы нәтижелер алынады. Иондардың қарастырылатын 10 – 150 кэВ энергиялары аралығында оның  $X$  тереңдігі (бет үстінен қашықтығы) Не иондары үшін 1000 Å-ден 5000 Å –ге дейін, ал аргон үшін ~ 200 Å-ден 1500 Å-ге дейін өзгеріп отырды. Жүргізілген есептеулердің нәтижесінде вольфрам бетінің тозаңдалу коэффициенттерінің гелий және аргон иондарының энергиясына тәуелділіктері алынды. Алынған нәтижелерді жуықтату түрін таңдаудың кейбір анықталмағандылығы бар, және ол ядролық өзара әрекет етудің болжалды потенциал түріне байланысты болады. Осы жұмыста алынған нәтижелерді талдау келесі түрдегі жалпы тәуелділік сипатын анықтауға мүмкіндік берді:

$$\lg S(E_0) = (a (\lg E_0)^2 + b \lg E_0 + c) / (\lg E_0 + d), \quad (3.1)$$

мұндағы  $a$ ,  $b$ ,  $c$  және  $d$  – әр түрдегі иондармен сәулелендіруге арналған әртүрлі тұрақтылар. Модельдеуші есептеулердің және оларды (1) түріндегі арақатынаспен жуықтату нәтижелері 3.1-суретте ұсынылған.



а- гелий иондары, б – аргон иондары

Сурет 3.1- Гелий және аргон иондарының  $E_0$  энергиясына вольфрамның тозаңдалу коэффициентінің тәуелділіктері. Модельдеу нәтижелері - нүктелермен, жуықтатушы формула бойынша есептеу нәтижелері - сызықтармен белгіленген (3.1)

Модельдеу нәтижелерін аналитикалық өрнекпен жуықтатуға арналған тұрақтылардың мәндері 3.1-кестеде көрсетілген.

| Ион           | a      | b     | c      | d       |
|---------------|--------|-------|--------|---------|
| $\text{He}^+$ | -1.103 | 7.185 | -13.57 | -1.615  |
| $\text{Ar}^+$ | -0.877 | 8.441 | -17.78 | -0.6793 |

Кесте 3.1-Вольфрамның тозаңдалу коэффициентінің иондар энергиясына тәуелділігіне арналған өрнектегі тұрақтылардың параметрлері (1)

Аргон иондарының нысана атомдарымен өзара әрекеттесуінің қимасы үлкен, сондай-ақ олар  $\alpha$ -бөлшектерге қарағанда, тезірек тежеліп, қозғалыстың бастапқы траекториясынан нашарлау ауытқиды. Өзара әрекеттесу қимасы кіші болған гелий иондарының проективтік жүгіру жолы үлкенірек, бұл ретте олар айтарлықтай энергия шығындарынсыз, үлкен тереңдіктерге дейін жетуі мүмкін. Олар атомдардан көп рет шағылыса отырып, өздерінің қозғалу бағытын күрт өзгерте алады, және кез келген дерлік тереңдіктен атомдық соқтығысу каскадтарын түрткілете алады. Барлық жағдайларда иондық ағындардың бағыты сәулелендірілетін үлгінің бетіне қатысты қалыпты болып таңдалып алынды, беттің бұдырлылығы ескерілмеді. Иондардың барлық түрлері үшін тозаңдалу коэффициентінің максималды мәні зерттелген энергиялық аралықта болатындықтан, энергияны одан әрі арттыру оның бірсарынды кемуіне ғана алып келеді, және қарастырылған мәндермен салыстырғанда елеусіз кіші болып қалады. Сондықтан, ұсынылған тозаңдалу коэффициентінің жуықтатушы

тәуелдігін едәуір үлкенірек энергиялар аралығындағы физикалық тозаңдалуды сипаттау үшін пайдалануға болады, бұл тозаңдалу коэффициентін экспресс бағалау үшін маңызды болып табылады.

*Вольфрам бетінің төмен энергиялы аргон иондарымен тозаңдалу коэффициенттерін эксперименттік түрде анықтау.*

Тозаңдалу коэффициенттерін эксперименттік түрде анықтау үшін екінші тарауда жан-жақты баяндалған әдістеме таңдалып алынды. Бетті иондармен тозаңдату ДЦ-60 ауыр иондар үдеткішінде жүргізілді. Ол үдеткіш иондық шоқтың моноэнергиялығы дәрежесінің жоғары болуымен сипатталады, бұл бетті тозаңдату бойынша эксперименттерді өткізуге мүмкіндік береді. Сондай-ақ, біз атқылаушы иондардың флюенсін қисынды анықтау үшін екінші реттік электрондық эмиссияны басатын құрылғыны әзірлеп шықтық, бұл тозаңдалу коэффициентінің қисынды анықталуын қамтамасыз етті. Атқылаушы иондар ретінде заряды +5 және энергиясы зарядына 20 кэВ құрайтын аргон иондары таңдалды, яғни ионның толық энергиясы 100 кэВ құрады. Тозаңдатылған атомдардың санын анықтау үшін біз негізгі әдіс ретінде – тозаңдатылған қабаттың қалыңдығын өлшеу әдісін, көмекші әдіс ретінде – салмақтық әдісті таңдап алдық. Тозаңдатылған қабаттың қалыңдығы протондарда Резерфордтық кері шашырау (РКШ) әдісі арқылы анықталады. Біз бұл әдістемені молибденнің тозаңдалу коэффициентін эксперименттік түрде анықтау үшін қолданғанбыз, ол арқылы алынған нәтижелер теориялық зерттеулермен және де басқа авторлардың өзге әдістемелер арқылы жүргізген зерттеулерімен әжептәуір үйлесті [76-77].

*Тозаңдалу коэффициентін эксперименттік түрде анықтау үшін вольфрам үлгілерін дайындау*

РКШ әдісімен тозаңдатылған қабаттың қалыңдығын анықтау арқылы вольфрам бетінің тозаңдалу коэффициенттерін эксперименттік түрде анықтау үшін үлгілер дайындалды, олар магнетрондық тозаңдату әдісі арқылы жабындалған қалыңдығы  $\sim 0.5$  мкм вольфрамдық жабыны бар алюминийлік қорытпадан жасалған ауданы  $15\text{ мм} \times 15\text{ мм}$  төсеніштер болып табылады. Тозаңдалу коэффициентін өлшеуге арналған үлгінің түрі 3.2-суретте сұлбалық нысанмен көрсетілген.

Магнетрондық жабындау әдістемесі мынадай: тозаңдатылатын нысана тазалығы жоғары вольфрамнан жасалған цилиндрлік пішіндегі диаметрі 40 мм, қалыңдығы 4 мм пластина болып табылады. Нысананы тозаңдату процесі тозаңдатылған титан - геттерде арнайы дайындалған тазартылған аргон атмосферасында 50 Вт қуат жағдайында жүргізілді. Тозаңдату барысында плазма түзуші газдың қысымы 0,1 Па құрады. Жабындалған қабаттың қалыңдығы тозаңдату уақыты арқылы анықталып, РКШ әдісімен бақыланып отырды. Нәтижесінде, алюминий төсеніште вольфраммен жабындалған қалыңдығы  $\sim 400$  нм қосқабатты үлгілер алынды, 3.2-кестені қараңыз.





Сурет 3.2 - Вольфрам нысанасын магнетрондық тозаңдату әдісі арқылы вольфрам қабатымен жабындалған үлгінің түрі

Жабындалған вольфрам қабатының қалыңдығы төмендегі ой-пікірлерді ескере отырып таңдалды.

Біріншісі – страгглинг аймағын есепке алғанда, түсуші иондардың жүгіру жолы толығымен тозаңдатылатын материалда жатуы керек (энергиясы 100 кэВ аргон иондарының жүгіру жолы - 30 нм, страгглинг – 26 нм құрайды).

Екіншісі – тозаңдатылатын материал қабатының қалыңдығы протондар энергиясы 1 МэВ жағдайында, алюминий – вольфрам шекарасын бекіту үшін жеткілікті болуы тиіс (вольфрамда энергиясы 1 МэВ протондардың жүгіріп өту жолы  $\sim 5.5$  мкм құрайды). Демек, дайындалған үлгілер қойылатын талаптарды қанағаттандырады.

| Үлгінің №                 | 1      | 2      | 3      | 4 (бақылау үлгісі) |
|---------------------------|--------|--------|--------|--------------------|
| Салмағы, г                | 0.6829 | 0.5546 | 0.7367 | 0.6818             |
| W қабатының қалыңдығы, нм | 455    | 441    | 415    | 440                |

Кесте 3.2 - Үлгілердің салмағы (дәлдігі  $\pm 0.1$  мг) және протондарда РКШ әдісімен өлшенген вольфрам қабатының қалыңдығы

*ДЦ-60 үдеткішінің ЭЦР-көзінің арнасында вольфрам бетін энергиясы 100 кэВ аргон иондарымен тозаңдату бойынша эксперименттер*

Вольфрам үлгілерін энергиясы 100 кэВ аргон иондарымен сәулелендіру ДЦ-60 үдеткішінің төмен энергиялы арнасында жүргізілді.

Алюминий төсеніште 3 вольфрам үлгісі сәулелендірілді: № 1 үлгі –  $\Phi = 5 \times 10^{16}$  ион/см<sup>2</sup> флюенсіне дейін, № 2 үлгі -  $\Phi = 5 \times 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup> флюенсіне дейін және №3 үлгі –  $\Phi = 1 \times 10^{18}$  ион/см<sup>2</sup> флюенске дейін. Үлгілерді сәулелендіру иондар шоғының вольфрамдық жабынның бетіне қалыпты түсуі кезінде жүргізілді, сәулелендірілетін бет - 1 см<sup>2</sup>, сәулелендіру температурасы 150 °С-тан аспады.

*РКШ әдісімен тозаңдатылған қабаттың қалыңдығын өлшеу арқылы вольфрамның тозаңдалу коэффициентін анықтау*

Аргон иондарымен сәулелендіргеннен кейін, вольфраммен жабындалған алюминий төсеніштегі № 1-3 үлгілерде РКШ әдісімен жабынның қалыңдығын

өлшеу жұмыстары жүргізілді. Кері шашыраған протондардың РКШ спектрлері және оларды осы үлгілер үшін тозаңдалуға дейінгі және тозаңдалудан кейінгі жуықтату нәтижесі 3.3-суреттерде көрсетілген.

Үлгілердің сәулелендіруге дейінгі және сәулелендіруден кейінгі спектрлерін салыстырудан 3.2-суреттерде №2 мен №3 үлгілер үшін вольфрам жабыны қалыңдығының азайғаны айқын білінеді. Спектрлерді өңдеу нәтижелері 3.3-кестеде келтірілген.

| Үлгінің №                                                  | №1 ( $\Phi=5 \times 10^{16}$<br>$\text{см}^{-2}$ ) | №2 ( $\Phi=1 \times 10^{17}$<br>$\text{см}^{-2}$ ) | №3<br>( $\Phi=1 \times 10^{18}$ $\text{см}^{-2}$ ) |
|------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| W қабатының<br>сәулелендіруге<br>дейінгі қалыңдығы,<br>нм  | 455                                                | 441                                                | 415                                                |
| W қабатының<br>сәулелендіруден<br>кейінгі қалыңдығы,<br>нм | 450                                                | 315                                                | 115                                                |

Кесте 3.3- Вольфрам қабатының энергиясы 100 кэВ аргонмен сәулелендіруге дейінгі және сәулелендіруден кейінгі протондарда РКШ әдісі арқылы өлшенген қалыңдығы

Кесте 3.3-те көрсетілген деректерден көрінетіндей,  $\Phi=5 \times 10^{16} \text{см}^{-2}$  флюенсімен сәулелендірілген үлгіні алмағанда, сәулелендіру вольфрам қабаты қалыңдығының едәуір кемуіне, яғни тозаңдалуына алып келді, онда қалыңдықтың өлшенген кемуі РКШ әдісі дәлдігінің шегінде.

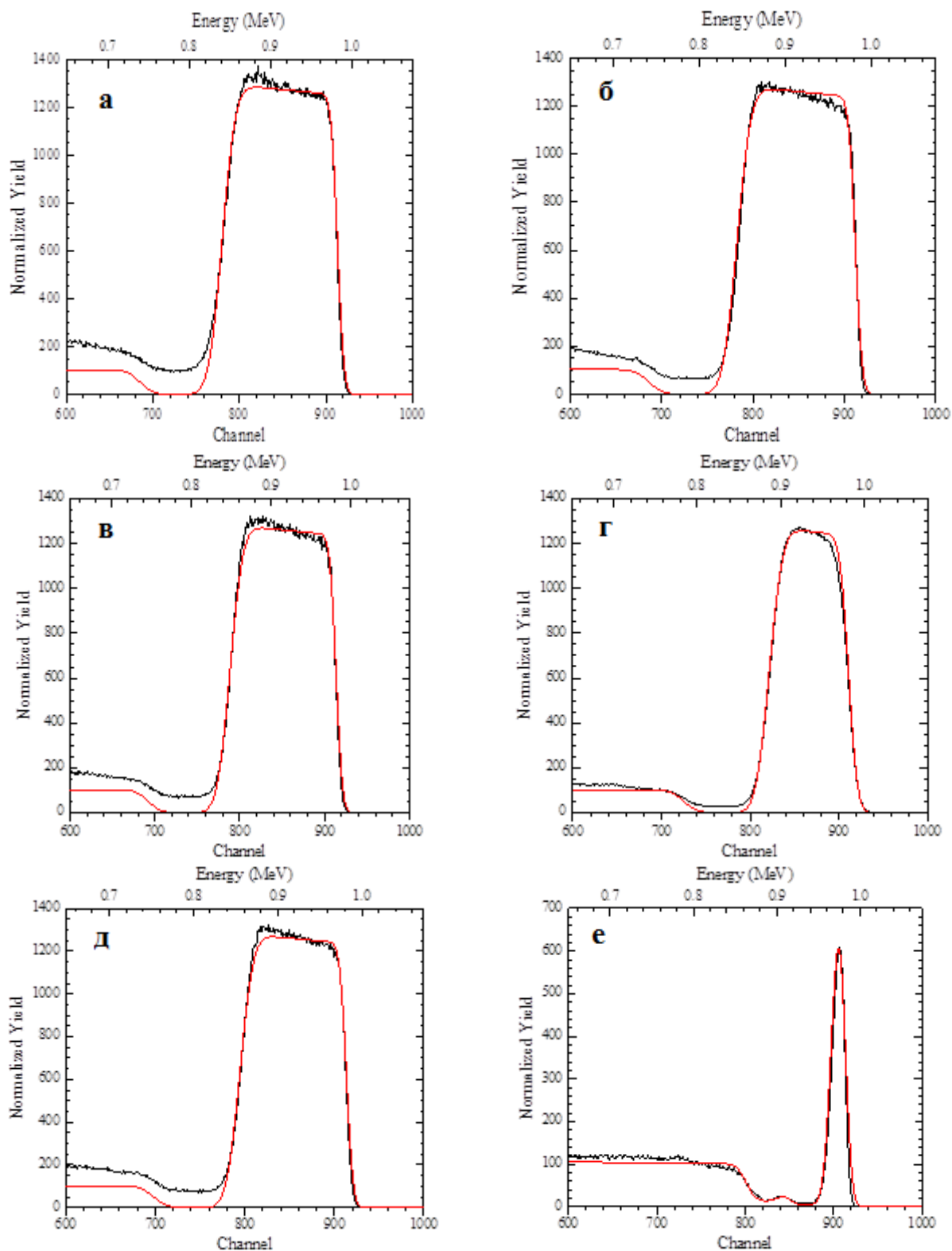
РКШ арқылы алынған деректер бойынша №2 және №3 үлгілер үшін беттің тозаңдалу коэффициенттері есептелді, 3.4-кестені қараңыз. Тозаңдалу коэффициенті мына формула бойынша есептелді:

$$K_S = N_{PA}/\Phi \quad (3.2)$$

мұндағы  $N_{PA}$  – тозаңдатылған атомдар саны,  $\Phi$  - түсуші иондар саны.

$$N_{PA} = N_A \times \rho \times V/A \quad (3.3)$$

мұндағы  $N_A$  –Авогадро саны;  $A$  - салыстырмалы атомдық масса, вольфрам үшін  $A = 184$ ;  $\rho$  –тығыздық, вольфрам үшін  $\rho=19.3 \text{ г/см}^3$ ;  $V = S \times \Delta h$ , мұндағы  $S$  – сәулелендірілетін бет  $S = 1 \text{ см}^2$ ,  $\Delta h$  – тозаңдатылған вольфрамның қалыңдығы, 3.3-кестеден алынған.



а – үлгісі №1 (сәулеленуден дейін), в – №2 (сәулеленуден кейін), д – №3 (сәулеленуден дейін); б – үлгісі №1 (флюенсінде  $5 \times 10^{16}$  ион/см<sup>2</sup>), г - №2 (флюенсінде  $1 \times 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup>), е - №3 флюенсінде  $1 \times 10^{18}$  ион/см<sup>2</sup>) сәулеленуден кейін.

Сурет 3.3 - Кері шашыраған протондардың энергиясы 100 кэВ  $\text{Ar}^{+5}$  иондарымен сәулелендіруге дейінгі және сәулелендіруден кейінгі РКШ спектрлері

| №                                                                                                                                               | $\Delta h$ ,<br>см   | $N_{SA}$              | $\Phi$ ,<br>см <sup>-2</sup> | $K_S$ ,<br>ат/ион | $K_S^*$ ,<br>ат/ион | $K_S^{**}$ ,<br>ат/ион | $K_S^{***}$ ,<br>ат/ион |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|-----------------------|------------------------------|-------------------|---------------------|------------------------|-------------------------|
| 2                                                                                                                                               | $1.26 \cdot 10^{-5}$ | $7.96 \cdot 10^{+17}$ | $5 \cdot 10^{+17}$           | 1.6               | 2.1                 | ~ 2                    | ~ 2                     |
| 3                                                                                                                                               | $3.00 \cdot 10^{-5}$ | $1.89 \cdot 10^{+18}$ | $1 \cdot 10^{+18}$           | 1.9               | 2.1                 | ~2                     | ~ 2                     |
| $K_S^{**}$ -Басқа авторлар эксперименттік түрде алған вольфрамның тозаңдалу коэффициенті (атқылаушы аргон иондарының кіші энергиясы үшін) [78]; |                      |                       |                              |                   |                     |                        |                         |
| $K_S^{***}$ -Басқа авторлар теориялық түрде алған вольфрамның тозаңдалу коэффициенті (атқылаушы аргон иондарының кіші энергиясы үшін) [79].     |                      |                       |                              |                   |                     |                        |                         |

Кесте 3.4 - Эксперименттік түрде өлшенген ( $K_S$ ), теориялық есептелген ( $K_S^*$ ) 100 кэВ вольфрамның аргон иондарымен тозаңдалу коэффициенті

Сондай-ақ, біз салмақтық әдіс арқылы тозаңдалу коэффициентіне бағалау жүргіздік. Осыдан алдын көрсеткеніміздей [80], бұл әдістің зертханалық аналитикалық таразыны пайдаланған кездегі дәлдігі (дәлдік  $\pm 0.1$  мг) салмақ шығынын өлшеу бойынша тозаңдалу коэффициентін қисынды анықтау үшін жеткіліксіз. Тоzaңдалу коэффициентін салмақтық әдіс бойынша бағалау РКШ әдісімен тозаңдатылған қабаттың қалыңдығын өлшеу бойынша  $K_S$  бағалаудан ~ төрт-бес есе жоғары.

3.4-кестеде көрсетілген энергиясы 100 кэВ аргон иондарымен вольфрамның тозаңдалу коэффициентінің эксперименттік ( $K_S$ ) және теориялық ( $K_S^*$ ) мәндерінің нәтижелерінен көрінетіндей, эксперименттік өлшенген және теориялық есептелген  $K_S$  әжептәуір үйлеседі. Бұл нәтижелер басқа авторлардың эксперименттік деректерімен және теориялық есептеулерімен де үйлеседі ( $K_S^{**}$  [79, б.60] және  $K_S^{***}$ [80,б.60]). Бұл ретте, [79 және 80] жұмыстардың авторлары эксперименттік өлшемдер мен теориялық есептеулерді атқылаушы аргон иондарының кіші энергиясы үшін (~ 50-60 кэВ) жүргізгендігін, және 3.4-кестеде келтірілген  $K_S^{**}$  пен  $K_S^{***}$  деректері осы жұмыстардан алынған деректерді жуықтату нәтижесі болып табылатынын айта кеткен жөн. Қолда бар әдеби дереккөздерге сүйене отырып, энергиясы 100 кэВ аргон иондарымен вольфрамның тозаңдалу коэффициентін анықтауды алғаш рет біз орындадық деуімізге болады. Тағы бір қызығушылық туындататын нәтиже - әртүрлі сәулелендіру флюенстері кезінде алынған тозаңдалу коэффициенттерінің айырмашылығы болып табылады. Тоzaңдалу коэффициентінің шамасына сәулелендіру флюенсінің ықпалы туралы жалпы пайымдаулардан шығатыны, түсуші иондардың флюенсі ұлғайған сайын беттің тозаңдалу коэффициенті де өсуі керек, алайда бұл бағытта эксперименттік зерттеулер де, теориялық есептеулер де жүргізілмегендігін әдеби деректерден білеміз [81,82]. Біздің нәтижелерге қарағанда, түсуші иондардың флюенсінен тәуелділік шынында да байқалады, және тозаңдалу коэффициенті бетті атқылаушы иондар флюенсінің ұлғаюымен бірге артады.

### **3.2 Импульстік сәулелендіру кезінде вольфрамның эрозиясы мен физика-механикалық қасиеттерінің өзгеруі**

Термоядролық қондырғыдағы плазманың үзілуі энергияның үлкен ағындарының камера қабырғасына бөлінуіне алып келеді. Импульстің ұзақтығы  $10^{-6}$ - $10^{-4}$  с кұрайды, энергия ағыны  $10^8$ - $10^{11}$  Вт·м<sup>-2</sup> кұрайды [43-44.б.31]. Қорғаныш жабын бетінің жоғары температурасының салдарынан, булану жүзеге асады және термо кернеулермен шартталған бүліну процесі болуы мүмкін. Бірінші қабырғаны қорғаудың перспективалық материалы вольфрам болып табылады. Осы мақсатта, вольфрамның іс-қимылын талдау үшін вольфрам үлгілерін импульстік электрондармен сәулелендіру бойынша эксперименттік зерттеулер және энергияның бет үстіне импульстік бөлінуі кезіндегі масса шығынын теориялық есептеулер жүргізіледі. Термоядролық қондырғыдағы плазманың үзілуі импульстік электрондық сәулелендіру арқылы модельденеді.

*Энергияның бет үстінде импульстік бөлінуі кезінде вольфрамның жылулық эрозия эффектілері мен физика-механикалық қасиеттерінің өзгеруін зерттеу.*

Энергияның бет үстінде импульстік бөлінуі кезінде вольфрамның жылулық эрозия эффектілерін және физика-механикалық қасиеттерінің өзгеруін эксперименттік зерттеу[83].

Импульстік электрондармен сәулелендіру кезінде жылулық эрозия эффектілерін және механикалық қасиеттердің өзгерістерін эксперименттік түрде анықтау үшін қосарлы ыстық қалыптау тәсілі арқылы дайындалған, тазалығы 99.97 салмақ.% кұрайтын поликристалдық вольфрам үлгілері әзірленді, дайындаушы PlanseeAG фирмасы, Австрия. Ауданы  $20 \times 2$  мм<sup>2</sup>, қалыңдығы 1 мм-ге жуық пластина болып табылатын үлгілер импульстік электрондармен сәулелендірілгеннен кейін беттің локалдық балқуы есебінен, бет құрылымын, микроқаттылығын және салмақ шығынын зерттеуге арналған.

*Сәулелендірілмеген вольфрам үлгілерінің құрылымын және физика-механикалық қасиеттерін зерттеу*

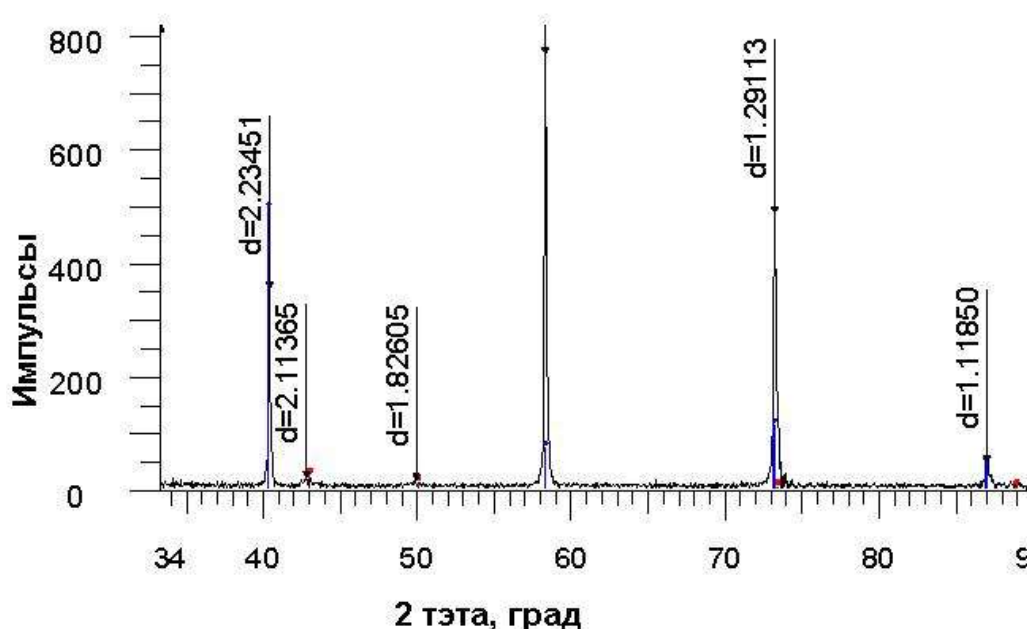
Импульстік электрондармен сәулелендірілген вольфраммен кейіннен салыстыру үшін бір өстік созылуға және иілуге арналған механикалық сынақтар өткізілді, сондай-ақ рентгенқұрылымдық талдау және атомдық-күштік микроскопия әдістері арқылы сәулелендірілмеген бастапқы үлгілердің құрылымын зерттеу, микроқаттылықты өлшеу жұмыстары жүргізілді.

Импульстік электрондармен сәулелендірген кездегі эрозия есебінен салмақ шығынын кейіннен өлшеуге арналған үлгілердің салмағы 3.5-кестеде көрсетілген. Үлгілердің беті зерттелуге дейін механикалық ажарлауға ұшырады.

|              |       |       |
|--------------|-------|-------|
| Үлгінің №    | 3     | 4     |
| Салмағы, мг  | 776.7 | 778.0 |
| Ұзындығы, мм | 20.2  | 20.0  |
| Ені, мм      | 2.0   | 2.1   |
| Биіктігі, мм | 1.0   | 1.0   |

Кесте 3.5 - Вольфрам үлгілерінің салмағы

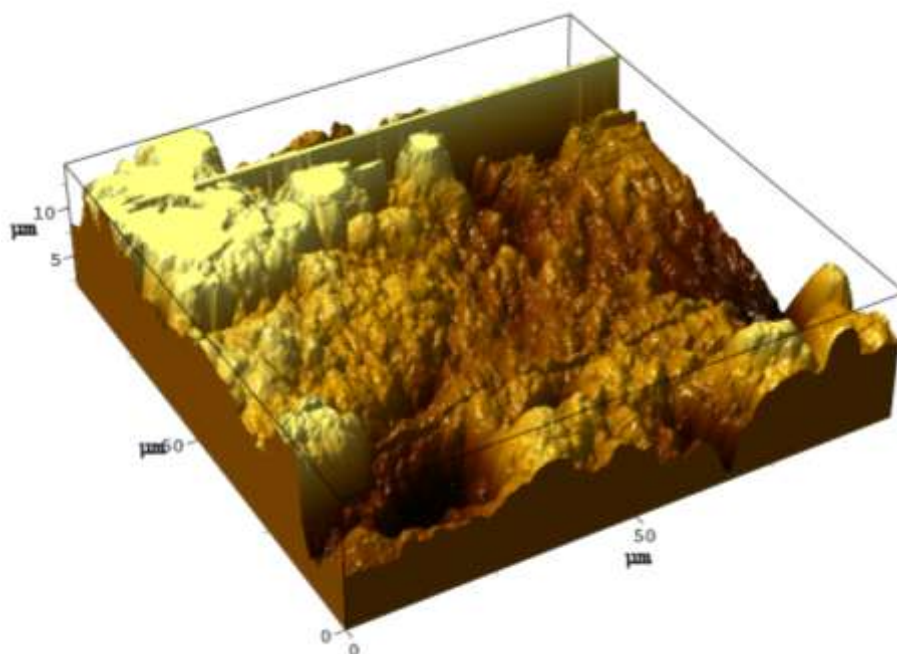
Дайындалған үлгілердің кристалдық құрылымы рентгенқұрылымдық талдау әдісі арқылы анықталды. Кристалдық құрылым жоғары дәрежеде жетілдірілген вольфрамның КЦК-торы болып табылады, тор тұрақтысы  $a = 3.1625 \pm 0.0002 \text{ \AA}$  құрайды (эталондық мәні  $a = 3.164 \text{ \AA}$ ), (200) және (211) жазықтықтары бойынша құрылымдылығы айқын білінеді (3.4-суретке қараңыз).



Сурет 3.4 - Сәулелендірілмеген вольфрамның дифрактограммасы

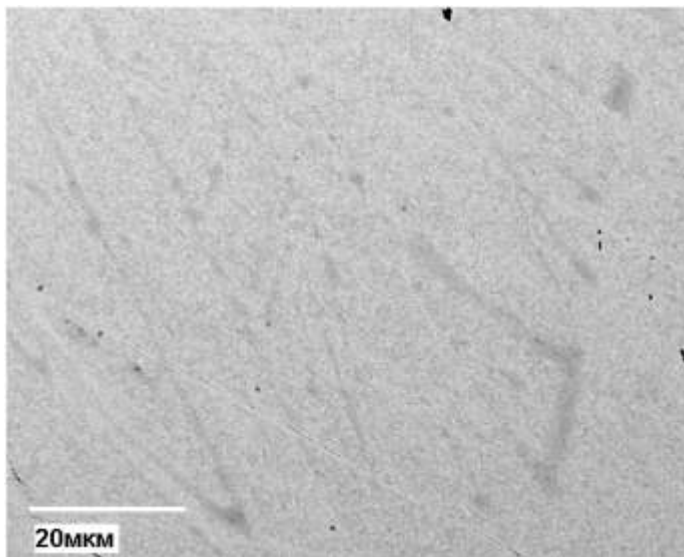
Сонымен қатар, дифрактограммада вольфрам сызықтарынан бөлек,  $\text{WO}_{2.9}$  қатысты деп айтуға болатын өте әлсіз үш сызық бар.

Ажарлау мен жалтыратуға дейін атомдық-күштік микроскопия әдісі арқылы беттің құрылымын зерттеуден көретініміз, беттің жоғары дәрежедегі бұдырлылығы байқалады, бұл ыстық қалыптау тәсілі арқылы дайындалғандығымен түсіндіріледі (3.5-суретті қараңыз).



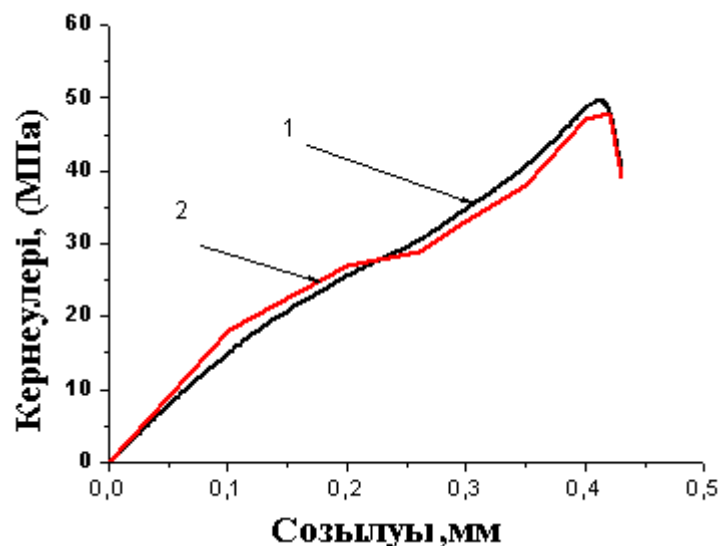
Сурет 3.5 - Вольфрам үлгісі бетінің ажарлау мен жалтыратуға дейінгі бедері

Абразивті қағаз бөлшектерінің көлемін біртіндеп кеміте отырып механикалық ажарлау мен МОИ пастасын пайдаланып шұғада жалтыратудан кейін беттің бұдырлылығы едәуір азайды, 3.6-суретті қараңыз.



Сурет 3.6-Вольфрам бетінің ажарлау мен жалтыратудан кейінгі СЭМ кескіні

Сәулелендірілмеген вольфрам үлгісін қысқа мерзімді механикалық сынақтаулар келесі өлшемдегі тегіс үлгілерде жүргізілді: үлгінің жұмыс бөлігінің ұзындығы 10 мм, ені 2 мм және қалыңдығы 1 мм құрады. Үлгілер бөлме температурасында, деформация жылдамдығы 0.5 мм/мин жағдайында сынақтан өткізілді. Сынақтардың диаграммасы 3.7-суретте көрсетілген.



1 - импульстік электрондармен сәулелендіруге дейін;

2 - импульстік электрондармен сәулелендіргеннен кейін.

Сурет 3.7- Деформация жылдамдығы тұрақты болған жағдайда, вольфрамды бір остік созылуға механикалық сынақтаудың диаграммасы

Сынақтар нәтижелері бойынша зерттелетін вольфрам беріктігінің және пластикалылығының келесі мәндері алынды: аққыштық шегі 40 МПа, беріктік шегі 52 МПа, пластикалылығы 4.2%. Вольфрам пластикалылығының төмен деңгейлі болуы назар аудартады, бұл вольфрамның ұнтақтық металлургия және қалыптау тәсілдері арқылы алынуымен түсіндіріледі.

Инденторға түсетін жүктеме 1.4 Н жағдайда, микроқаттылықты Виккерс бойынша өлшеу. Микроқаттылықтың орташаланған мәні 216 МПа құрады.

*Вольфрам үлгілерін импульстік электрондық шоқпен сәулелендіру.* Ауданы  $20 \times 2 \text{ мм}^2$ , қалыңдығы 1 мм өлшемді екі вольфрам үлгісі ҚР ҰЯО Атом энергиясы институтының импульстік электрондық үдеткішінде импульстік электрондармен сәулелендірілді. Сәулелендіру параметрлері: электрондардың энергиясы 500 кэВ, үлгідегі ток 10 кА, импульс ұзақтығы 2 мкс. Бір үлгі бір еселі импульспен, екіншісі – екі еселі импульспен сәулелендірілген, әр импульстің ұзақтығы 2 мкс, 3.8-суретті қараңыз.

*Импульстік электрондармен сәулелендірілген вольфрам үлгілерінің құрылымы мен қасиеттерін зерттеу*

Импульстік электрондармен сәулелендіргеннен кейін салмақ шығынын анықтау үшін сәулелендірілген үлгілердің салмағын өлшеу, құрылымын зерттеу және бір остік созылуға арналған механикалық сынақтау, сондай-ақ микроқаттылықты өлшеу жұмыстары жүргізілді.





а – импульстік электрондармен сәулелендіру кезінде үлгіні бекіту,  
б – екі реттік импульспен сәулелендірілген үлгі.

Сурет 3.8 - Импульстік электрондық үдеткіште вольфрам үлгісін сәулелендіру процедурасы

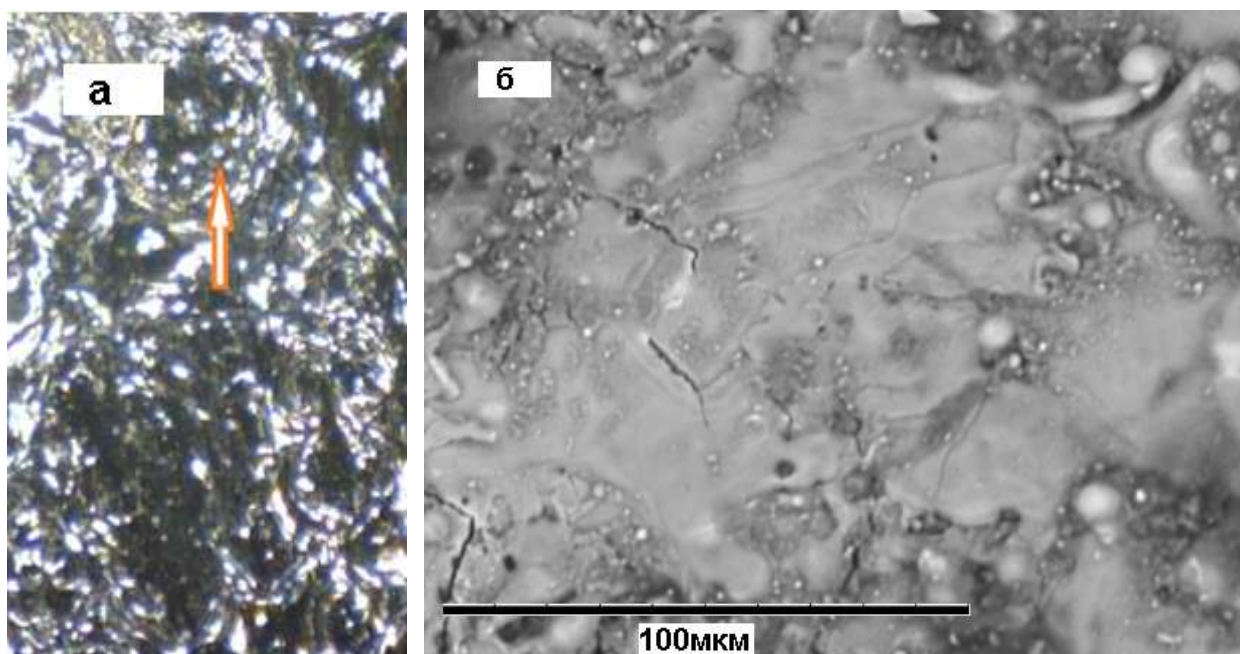
Бір еселі және екі еселі импульстермен сәулелендірілген үлгілерді өлшеу нәтижелері 2.6-кестеде келтірілген.

| Үлгі №                                          | 1           | 2           |
|-------------------------------------------------|-------------|-------------|
| *Салмағы, мг                                    | 775.8 (1.9) | 773.9 (4.1) |
| Ұзындығы, мм                                    | 20.2        | 20.0        |
| Ені, мм                                         | 2.0         | 2.1         |
| Биіктігі, мм                                    | 1.0         | 1.0         |
| * Жәкшаларда масса шығынының шамасы көрсетілген |             |             |

Кесте 3.6 – Бір еселі (№1 үлгі) және екі еселі (№2 үлгі) электрондық импульстермен сәулелендірілген вольфрам үлгілері массасының шығыны [83.6.61]

Кестеде келтірілген деректерден бір еселі импульс кезінде масса шығынының жергілікті балку аймақтарындағы вольфрамның булануы есебінен массаның шығыны 1.9 мг құрайды, ұзақтығы мен қуаты бірдей екі тізбекті импульстері кезінде – 4.1 мг, яғни массаның екі есе үлкен шығыны.

Вольфрам үлгілерінің импульстік электрондық шоғымен сәулелендірілген беттің құрылымын зерттеу сәулеленген бетте балқытпаның қатып қалған тамшылары болып табылатын дөңгелек пішіннің қалыптасуы байқалатынын көрсетті, 3.9-суретті қараңыз. Бұдан басқа, үлгілердің сәулеленетін бетінде бір еселі импульстен кейін де, екі еселі импульстен кейін де микросызаттар байқалды (3.9 сурет).



а – оптикалық микроскопия; б – растрлық электрондық микроскопия

Сурет 3.9 - Вольфрамның бір еселі импульсімен сәулелендірілген вольфрам бетінің морфологиясы, балқытпа іздері сызықпен көрсетілген

*Бетте энергияның импульстік шығаруы кезінде вольфрамдағы жылу эрозиясының эффекттерінің теориялық зерттеуі*

Вольфрам бетінде энергияның импульстік шығаруы кезінде (импульстік электрондық сәулелену) температуралық өрістер үлестірілімінің және масса шығынының есептері жүргізілді. Электрондық сәулелендіру сәулеленетін беттің жұқа қабатындағы импульстің жылу бөлінуіне және берілуіне әкеледі. Бірінші кезеңде фазалық түзілуді, яғни материалдың балқуы мен булануын есепке ала отырып, уақытқа байланысты сәулеленетін нысанадағы температураның үлестірілуін анықтау қажет. Температуралардың үлестірілімі бойынша буланған қабаттың қалыңдығын және булану есебінен массаның шығынын бағалауды жүргізуге болады. Жылу эрозиясының моделі жұмыста көрсетілген [84].

Жылу эрозиясының эффекттерін есептеу эксперименттік және теориялық нәтижелерді салыстыру үшін ҚР ҰЯО үдеткішінде импульстік электрондық сәулелендіруге сәйкес келетін беттегі энергияның импульстік шығару параметрлерімен вольфрам үшін орындалған. Есептеулерді жүргізу термофизикалық параметрлердің температураға тәуелділігінің түріне байланысты есептік модельді нақтылауды талап етті.

Модель материалдың бетінде жылудың импульстік шығаруы кезінде жылу өткізгіштік теңдеуді шешуге және фазалық түрленуді, яғни балқу мен булануды есепке ала отырып, материалдың тереңдігі бойынша температуралардың үлестірілуін анықтауға негізделген. Буланған материалдың саны эрозияның шамасын бағалауға мүмкіндік береді.

Сәулелендіру бетіне  $J$  энергия ағыны Гаусс үлестірілуімен беріледі:

$$J = J_0 \times 1 / (2\pi\sigma)^{1/2} \times \exp(-r^2/2\sigma^2) \quad (3.4)$$

мұнда  $t_0$  – импульстің ұзақтығы,  $\sigma$  – дисперсия.

Есеп уақытқа байланысты температуралық өрістер мен булану жылдамдығын анықтаудан тұрады.  $r, z$  координаттарының цилиндрлік жүйесіндегі жылуөткізгіштік теңдеуі шешіледі:

$$\rho C_p \partial T / \partial t = 1/r \times \partial / \partial r (k r \partial T / \partial r) + \partial / \partial z (k \partial T / \partial z) \quad (3.5)$$

мұнда  $\rho$  – матрицаның тығыздығы,  $C_p$  – меншікті жылу сыйымдылығы,  $k$  – жылу өткізгіштігі.

Термофизикалық параметрлер. Температураның үлестірілуін және булану жылдамдықтарын есептеу кезінде пайдаланылатын вольфрам үшін физикалық параметрлер жұмыстан [85] алынған. Бұл параметрлердің мәндері 3.7-кестеде келтірілген.

| Физикалық параметр                          | Белгісі, өлшем бірлігі  | Мәні               |
|---------------------------------------------|-------------------------|--------------------|
| Балқу температурасы К                       | $T_{\text{бал}}$        | 3687               |
| Атом массасы, м.а.б                         | $m_A$                   | 183.85             |
| Тығыздығы, $\text{кг} \times \text{м}^{-3}$ | $\rho$                  | $19.35 \cdot 10^3$ |
| Балқу энтальпиясы, $\text{Дж кг}^{-1}$      | $\Delta H_{\text{бал}}$ | $1.91 \cdot 10^5$  |
| Булану энтальпиясы, $\text{Дж кг}^{-1}$     | $\Delta H_{\text{бул}}$ | $4.19 \cdot 10^6$  |

Кестесі 3.7 - Вольфрамның жылу эрозиясы есептерінде қолданылатын термофизикалық параметрлер [85, Б.67]

Температураға байланысты параметрлерді жуықтату жұмыстың деректері негізінде орындалған [86, 87].

Жұмыс нәтижелеріне [75, б.48] сәйкес  $\text{Дж} \times \text{кг}^{-1}$  бірлігіндегі қатты және сұйық фазалардың  $C_p$  жылу сыйымдылығы фазалық ауысуды есепке ала отырып, өрнекпен жуықталады:

$$C_p = (3.5543 \times 10^{-9} \times T^3 - 1.008 \times 10^{-5} \times T^2 + 0.031662 \times T + 120.58) \times (T < T_{\text{пл}}) + C_{\text{SL}} \times (T \geq T_{\text{бал}}) \times (T \leq T_{\text{SL}}) + 203.7 \times (T > T_{\text{SL}}) \quad (3.6)$$

мұнда  $(T_{\text{SL}} - T_{\text{бал}}) \sim 300 \text{K}$ .  $C_{\text{ps}}$  қатты фазасының жылу сыйымдылығының бірінші мүшесі жұмыстың [75, б.48] деректеріне сәйкес ұсынылған, екінші мүшесі  $C_{\text{SL}}$  фазалық ауысудың жасырын жылуымен шартталған жылу сыйымдылыққа сәйкес келеді, үшінші мүшесі сұйық фазаның (тұрақты мәні) жылу сыйымдылығына тең. Мұнда және одан әрі, шамалардың қатынас белгілері ауыспалы буль ретінде анықталған.

Сублимацияланған газдың тепе-теңдік қысымы. Вольфрам үшін сублимацияланған газ қысымының тепе-теңдік мәні:

$$Peq=8.2 \times 10^{12} \times 10^{(-44779/T)} \quad (3.7)$$

$k_s$  қатты фазасының жылу өткізгіштігі Вт м-1К-1 бірлігінде жұмысқа [75,6.48,67,6.43] сәйкес өрнекпен берілген:

$$k = 1 \times 10^{(-26989 \times (T_2 + 193.24/T + 1.9024))} \times (T \leq T_{бал}) + k_L \cdot (T > T_{бал}) \quad (3.8)$$

мұнда бірінші мүше -  $k_s$  қатты фазаның жылу сыйымдылығы;  $k_L$ -сұйық фазаның жылу сыйымдылығы. Сұйық фазаның жылу өткізгіштігінің қатты мәніне орташа қатынасы, фазалық түрлену аймағында  $k_L/k_s = 0,53$  құрайды; балқудың төмен температуралы металдар үшін бұл аймақтың қарым-қатынасы (0,5÷ 0,6) мәндер аралығында жатыр [76, 6.56]. Вольфрам сұйық фазасының  $k_L$  жылу өткізгіштігінің мәні тең қабылданды:

$$k_L=45.545; T > T_{бал} \quad (3.9)$$

Жылу сәулеленуінің коэффициенті. [75,6.48;76,6.56] жұмыстың кестелік мәніне сәйкес,  $\varepsilon$  жылу сәулеленуінің коэффициенті өрнекпен анықталды:

$$\varepsilon=1.5558 \times 10^{-1}+2.1458 \times \text{Log}(T/1200), T \geq 800K \quad (3.10)$$

Соңғы элементтер әдісі арқылы бетте импульстік энергия шығару кезінде вольфрам үшін температураның үлестірілімі және булану жылдамдығын есептеу жүргізілді. Температура өрістерін есептеу координаттардың декарттық жүйесінде жүргізілді; сәулеленетін бет (x,y) жазықтықта өлшемі  $(10 \times 2) \times 10^{-3}$  м тікбұрыш болып табылады,  $z = 3 \times 10^{-4}$  м. координатасы бойынша есептік ұяшықтың өлшемі. Анықтау теңдеулері соңғы элементтер әдісімен шешілді, аймақтың триангуляциясы сәулеленетін бетке қойылумен алынған. Анықтаушы теңдеудің түрі:

$$\rho \times C \times \partial T / \partial t = k \Delta T + (J + J_{ev} + \varepsilon \times \sigma_{SB} \times (T - T_{ам})^4) \quad (3.11)$$

мұнда  $\sigma_{SB}$ -Стефан Больцман тұрақтысы,  $T_{ам}$  - қоршаған ортаның температурасы (=300K),  $C$  жылусыйымдылығының және  $k$  жылу өткізгіштіктің мәні фазалық күймен және температурамен анықталды. Матрица көлемінде екінші мүше нөлге тең болды; сәулеленетін бетте ескерілді. Есептеулерде жоғарыда келтірілген температураға термофизикалық параметрлердің тәуелділігі үшін аналитикалық өрнектер пайдаланылды. Температурамен өзгермейтін вольфрамның физикалық параметрлерінің мәндері, тиісінше  $T_{бал}$  балқу температурасы,  $M$  атом массасы,  $\rho$  тығыздығы 1-кестеде келтірілген.

Энергия шығару импульсті электрондық шокпен сәулелендіруге сәйкес келеді,  $J = 4 \times 10^{11}$  Вт× м<sup>-2</sup> энергия ағыны, импульстің ұзақтығы  $t = 2 \times 10^{-6}$  с.

Матрицаның сублимацияланған атомдарымен алып кететін  $J_{ev}$  энергия ағыны өрнекпен анықталды:

$$J_{ev} = 1/4 \times n \times v \times m_a \times \Delta H_{бул} \quad (3.12)$$

мұнда  $n$  - көлем бірлігіндегі газ атомдарының саны,  $m_a$  - атом массасы,  $v$  - газ молекуласының орташа жылдамдығы. Идеалды газға жуықтау бойынша соңғы арақатынас келесі түрде болады:

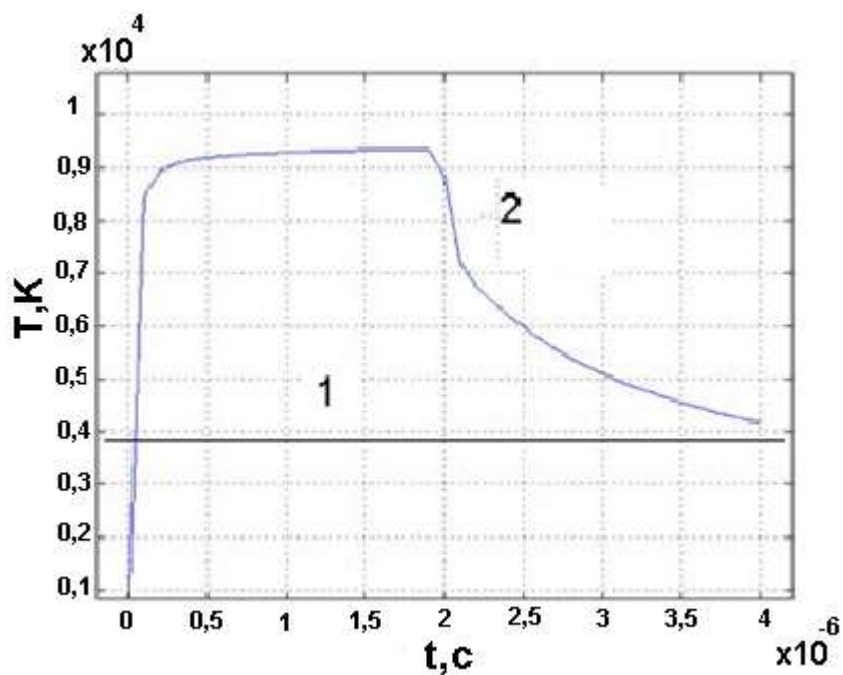
$$J_{ev} = P_{eq} \times [m_a / (2kT\pi)]^{1/2} \Delta H \quad (3.13)$$

Соңғы өрнек реконденсация процесін ескермейді, оны есепке алуы 0,8 жуық қосымша көбейткішке әкеледі. Осы есепте реконденсация процесі ескерілмеген. Соңғы арақатынасына сәйкес, алып кету массасының ағыны  $J_m$ :

$$J_m = J_{ev} / \Delta H \quad (3.14)$$

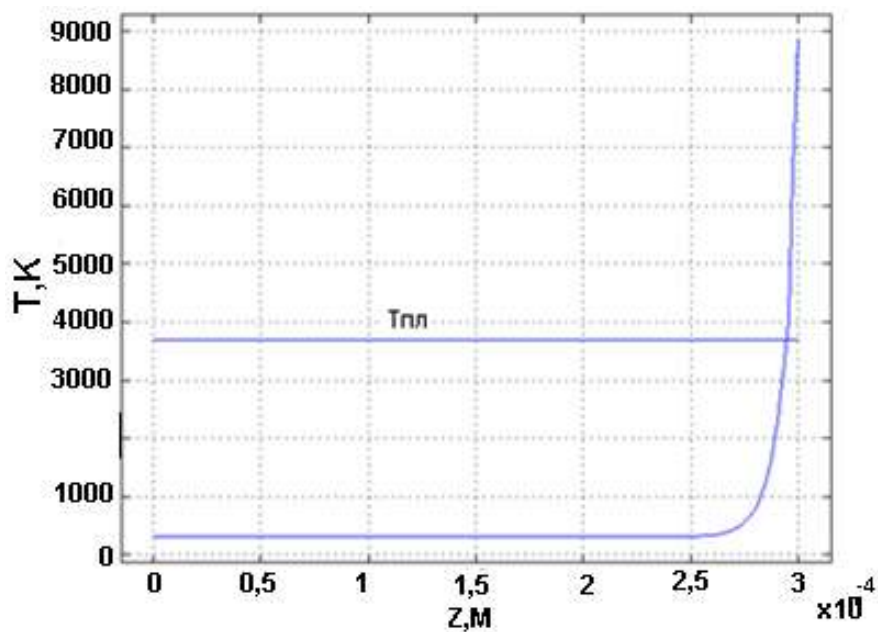
3.10 және 3.11 суреттерінде температураның үлестірілуін есептеу нәтижелері келтірілген. 3.10 суретте электрондардың түсуші шоғының өсі бойынша сәулеленетін беттегі температураның уақыттан тәуелділігі келтірілген, яғни электрондар шоғының энергиясы Гаусстық үлестірілумен ұсынылғандықтан, онда бетте максималды энергия шығару үшін. Суреттен шоқтың әрекет ету уақытының ұлғаюымен температура бірқалыпты өсетінін және 0.5 мкс ~ тең уақыт аралығында максималды мәнге жететінін көруге болады. Температураның максималды мәні 9000 К жетеді, бұл вольфрамның балқу температурасынан екі есе артық.

Сәулелендірілген вольфрамның тереңдігі бойынша температураны бөлінуі 3.10-суретте көрсетілген. Суретте көрсетілгендей, вольфрамның тереңдігі бойынша балқуы болмашы және  $J = 4 \times 10^{11} \text{ Вт} \times \text{м}^{-2}$  тең импульстік электрондар ағынының энергиясы үшін есептегенде микрондар үлесін құрайды және импульстің ұзақтығы  $t = 2 \times 10^{-6} \text{ с}$ , балқытылған қабаттың қалыңдығы 3.84 мкм болады.



1 – вольфрамның балку температурасы, 2 – электрондық шоқтың осі бойынша беттегі температураны есептеу.

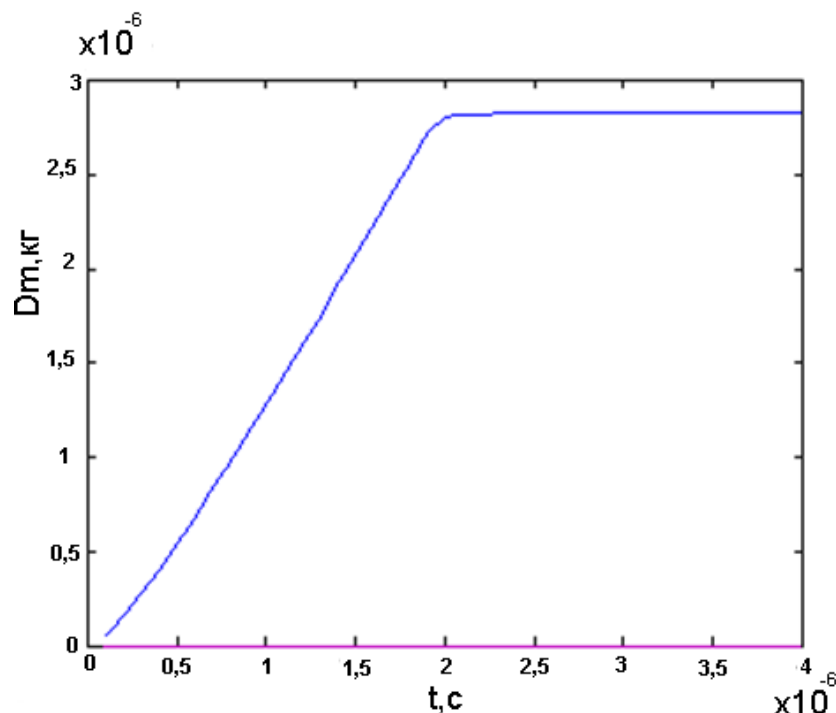
Сурет 3.10 - Энергиясы  $J = 4 \times 10^{11} \text{ Вт} \times \text{м}^{-2}$  және импульсінің ұзақтығы  $t = 2 \times 10^{-6} \text{ с}$  импульстік электрондар ағынымен сәулелендірілген кезде вольфрам бетіндегі  $t$  уақыттан  $T$  температураның тәуелділігі



Сурет 3.11- Сәулелендіру әрекеті аяқталу мезетіндегі сәулелендірілген вольфрамның тереңдігі бойынша температураның тәуелділігі

3.12-суретте буланудың салдарынан уақыттан тәуелді вольфрамның масса шығынын есептеу көрсетілген. Электрондық шоқтың параметрлері 3.10 және

3.11-суреттердегі сияқты: импульстік электрондар ағынының энергиясы  $J = 4 \times 10^{11} \text{ Вт} \times \text{м}^{-2}$ , импульстің ұзақтығы  $t = 2 \times 10^{-6} \text{ с}$ . Суреттен көрініп тұрғандай, масса шығынының жылдамдығы импульстің әрекет ету уақытына тең уақыт кезеңінде стационарлық мәнге жетеді. Параметрлері көрсетілген электрондық импульстің әрекет етуі кезінде массаның толық шығыны  $D_{\text{total}} = 2.8 \text{ мкг}$  болады.



Сурет 3.12 - Энергиясының ағыны  $J = 4 \times 10^{11} \text{ Вт} \times \text{м}^{-2}$  және импульстік ұзақтығы  $t = 2 \times 10^{-6} \text{ с}$  болатын электрондық импульстің әрекет ету кезіндегі  $Dm$  масса шығынының  $t$  уақыттан тәуелділігі

### 3.3 Қалдық газ плазмасының иондармен сәулелендірілген жоғары таза вольфрам бетінің құрылымы мен қасиеттерін зерттеу

Плазма бұзылуынан басқа, күшті импульстік жылу ағындары диверторлық пластиналарына шығарылған кезде бірнеше микросекундтың секундына дейінгі, қысқа мерзімді импульстар әлдеқайда төмен энергияны босатумен бірге диверторлық пластиналарға әрекет етеді [43-44, б.31]. Қысқа мерзімді энергетикалық импульстердің әсерлерін анықтау үшін, иондар плазма ағынымен разрядталған вольфрамның құрылымын және салмағын жоғалтуын зертханалық зерттеулер жүргізілді [88, 89]. Зерттеу жұмыстарының мақсаты плазманың вольфрам құрылымы мен қасиеттеріне әсерін талдап тексеру. Бұл жұмыста қалдық газдардың (азот, оттегі, сутегі) солғын разряды плазмасынан алынған иондардың кеңістіктік зарядының бойлық автотербелістерінің импульстік әсері зерттеледі. Мұндай әсер материалдың механикалық қасиеттерінің өзгеруіне алып келетін иондық сәулелендіру (иондардың энергиясы 100 эВ-ден аспайды) мен соқпылап әсер етуді біріктіреді.

Үлгілер, сәулелендіру және зерттеу әдістері. Зерттеу үшін жоғары таза вольфрам үлгілері дайындалды. Дайындық жұмысына ГОИ пастасын қолдана отырып, механикалық ажарлау мен жылтырату кірді.

Вольфрамның екі үлгісі арнайы әзірленген плазмалық генераторға орналастырылады, сонан соң жүйені вакуумдаудан кейін үлгілер қалдық газ иондарымен атқыланады [90]. Плазмалық генератордың жұмыс параметрлері төмендегідей: ток – 50 мА, кернеу - 1900 В. Үлгілердің ұсталу уақыты бірдей болды және ол 15 минут, сонымен қатар №1 үлгіні сәулелендіру кезіндегі автотербелістердің жиілігі 15.8 МГц, № 1 үлгінікі – 25,3 МГц болды.

Плазмалық әсерге дейін сәулелендірілген материалдың осы қасиеттерімен салыстыру үшін вольфрамның екі үлгісінің бетінің құрылымы және қасиеттері анықталды. Сәулелендірілген вольфрам үлгілері бетінің құрылымы мен қасиеттері сәулелендіруге дейінгі қолданылған әдістермен жүзеге асырылды. Келесі сипаттамалары анықталды:

- үлгілердің салмағы (ОНАУС электрондық таразылары);
- D8 ADVANCE дифрактометрінде рентген-фазалық талдау әдісі арқылы кристалдық құрылымы;
- Энергия-дисперсті рентгендік микроталдау (ЭДРТ) және атомдық-күштік микроскопияға (ХЕ-100 микроскопы) арналған приставкасы бар PhenomProX сканерлеуші электронды микроскопты пайдалана отырып, беттің құрылымы және элементтік құрамы;
- микроқаттылық (SHIMADZU микроқаттылықты өлшеуіш)
- беттің кедір-бұдырлығы(DIAVITEDH-5 профилометрі).

Сәулелендіруге дейінгі вольфрамның құрылымы мен қасиеттері. Радиациялық әсерге дейінгі және кейінгі вольфрам үлгілерін өлшеу нәтижелері 3.8-кестеде келтірілген.

| Үлгінің №  | 1                    |                       | 2                    |                       |
|------------|----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|
|            | Сәулелендіруге дейін | Сәулелендіруден кейін | Сәулелендіруге дейін | Сәулелендіруден кейін |
| Салмағы, г | 3.8447 ± 0.0001      | 3.8446 ± 0.0001       | 4.5513 ± 0.0001      | 4.5511 ± 0.0001       |

Кесте 3.8 - Сәулелендіруге дейінгі және кейінгі вольфрам үлгілерін өлшеу нәтижелері

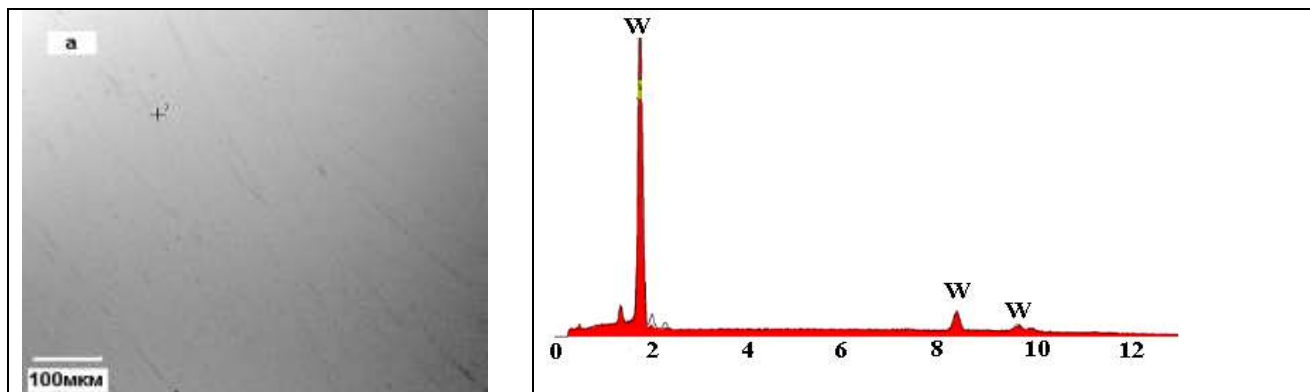
Вольфрам үлгілерін элементтік талдау сканернерлеуші электрондық микроскопының приставкасы ЭДРТ қолдана отырып орындалды, нәтижелер 3.13-суретте және 3.8-кестеде көрсетілген. Беттің жеке бөліктерінде оттегі бар, оның пайда болуы үлгілерді дайындау кезінде МОИ пастасын пайдаланып ажарлау және жылтыратудың салдары болуы мүмкін. 3.9-кестеде спектрді өңдеу нәтижесі көрсетілген (3.13-сурет, б).



| Элементтің<br>реттік № | Элемент  | Концентрациясы,<br>ат. % | Концентрациясы, сал. % |
|------------------------|----------|--------------------------|------------------------|
| 74                     | Вольфрам | 100.00                   | 100.00                 |

Кесте 3.9 -Вольфрам үлгілерінің элементтік құрамы

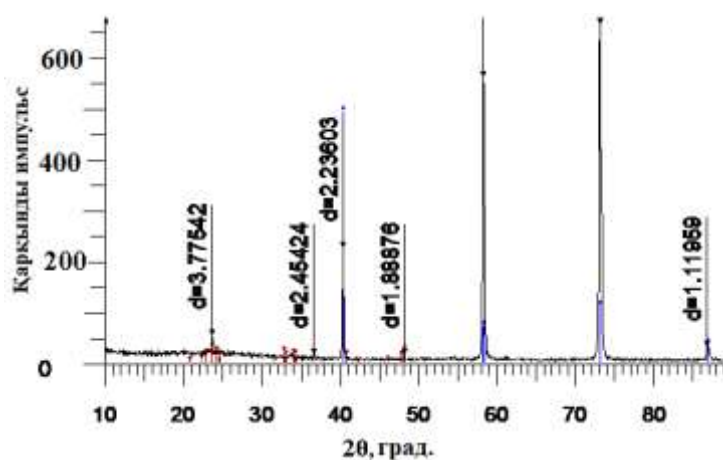
Үлгілердің элементтік құрамын анықтау нәтижелерінен зерттеуге арналған материал расында таза вольфрам болып табылатыны көрініп тұр, 3.9-кестеде бейнеленген.



а – №1 вольфрам үлгісі бетінің кескіні, (+) элементтік құрамды анықтау орыны көрсетілген; б – рентгендік спектр.

Сурет 3.13 - Сәулелендіруге дейін вольфрам бетін элементтік талдау нәтижелері

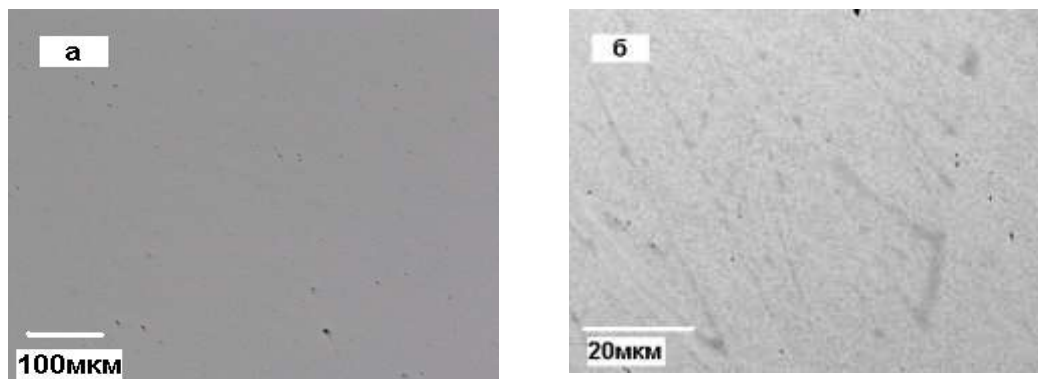
Вольфрамның құрылымдық зерттеулері. Вольфрамның кристалдық құрылымы ол тор тұрақтысы  $a = 3.170774 \text{ \AA}$  болатын және кристалдық торы өте жоғары дәрежелі жетілдірілген КЦК тор болып табылады. 3.14- суретте келтірілген



Сурет 3.14 - Сәулелендіруге дейінгі вольфрам үлгілерінің диффрактограммасы

Вольфрам сызықтарымен қатар, WO<sub>3</sub> жатқызуға болатын үш өте жіңішке сызықтар бар екенін атап өтуге болады. Бірақ бұл қосылыстың мөлшері боламашы ғана.

Радиацияның әсеріне дейінгі үлгілер бетінің құрылымы 3.15-суретте ұсынылған, онда №1 бет үлгісінің ОМ және СЭМ кескіндері көрсетілген.

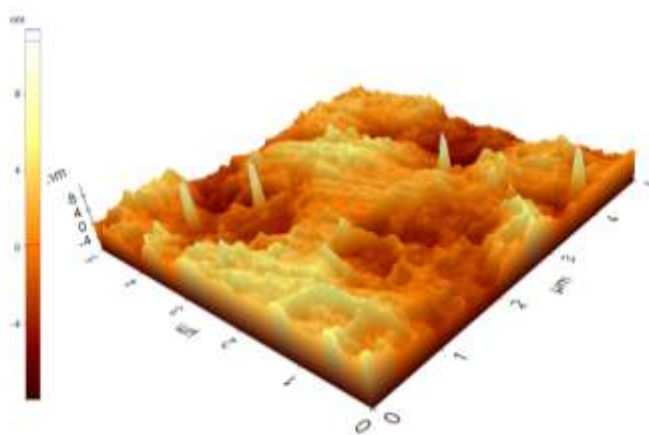


а – ОМ; б – СЭМ.

Сурет 3.15 - Сәулелендіруге дейінгі дайындалған №1 вольфрам үлгісі бетінің кескіндері

Сондай-ақ сәулелендіруге дейін АҚМ әдісімен беттің құрылымына зерттеулер жүргізілді. Атомдық-күштік микроскопия деректері бойынша №1 үлгі бетінің құрылымы 3.16-суретте келтірілген.

АҚМ әдісімен бет құрылымын зерделеу бойынша жоғарыда келтірілген деректерден бет жеткілікті түрде тегіс екендігі, кедір-бұдырлығы 5 мкм × 5 мкм болатын алаңшада 8 нм-ден аспайтыны көрінеді. 3.15 және 3.16-суреттердігі нәтижелерден үлгілердің беті сәулелендіру және кейіннен қалдық газ плазмасының иондарымен сәулелендіру әсерін зерттеу үшін жеткілікті жақсы дайындалғанын көруге болады.



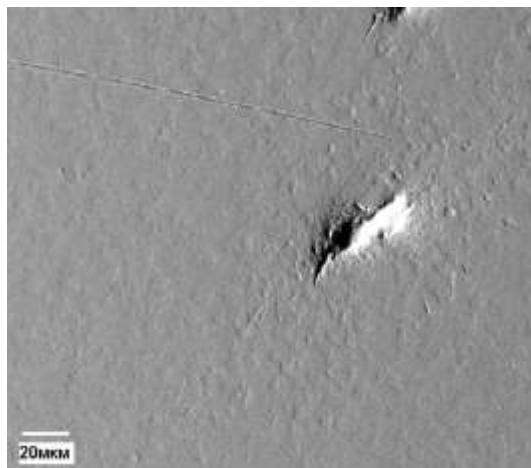
Сурет 3.16 - Сәулелендіруге дейінгі №1 вольфрам үлгісі бетінің АҚМ кескіні

Құрылымдық зерттеулермен қатар, микроқаттылық (Виккерс бойынша) өлшенді. №1 және №2 үлгілері микроқаттылығының орташаланған мәні сәйкесінше 785 Н және 845 Н болды.

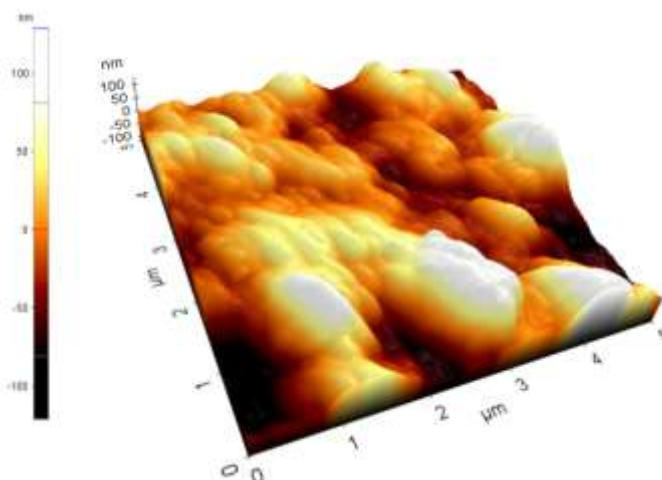
Сәулелендіруден кейінгі вольфрамның құрылымы мен қасиеттері. Солғын разряд плазмасынан алынған қалдық газдар иондарының кеңістіктік зарядының бойлық автотербелістерінің импульстік әсерінен кейін вольфрам бетінің құрылымы мен қасиеттерін зерттеу сәулелендіруге дейін қолданылған әдістермен орындалды.

ЭДРТ және рентген-құрылымдық талдау нәтижелері көрсеткендей, құрылым-фазалық және элементтік құрамы өзгерген жоқ. СЭМ және АҚМ әдістерімен зерттеу нәтижелерінен бет құрылымының елеулі өзгерістерге ұшырағаны көрінеді.

3.17 және 3.18 суреттерде СЭМ және АҚМ әдістері көмегімен алынған бет құрылымының кескіні келтірілген.

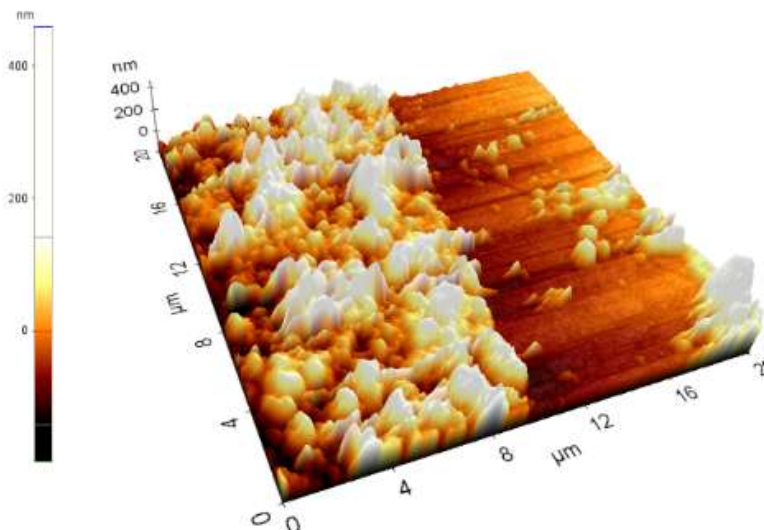


Сурет 3.17 - Солғын разряд плазмасынан алынған қалдық газдар иондарымен сәулелендірілген №2-үлгі бетінің СЭМ кескіні



Сурет 3.18 - Қалдық газдар иондарымен сәулелендірілгеннен кейінгі №2-үлгі бетінің АҚМ кескіні

Қалдық газдардың солғын разряды плазмасынан алынған иондардың кеңістіктік зарядының бойлық автотербелістерінің импульстік әсері вольфрам беті құрылымының елеулі өзгеруіне алып келеді (3.18 және 3.19-суреттер). Бетте биіктігі 100 нм дейін болатын жүйесіз пішіндегі дөңестер (3.18-сурет) пайда болады. Беттің кедір-бұдырлығы айтарлықтай артады және әсіресе, 3.19-суретте көрсетілген №2 үлгінің сәулелендірілген және сәулелендірілмеген бөліктерінің суреттері арқылы айқын көрінеді.



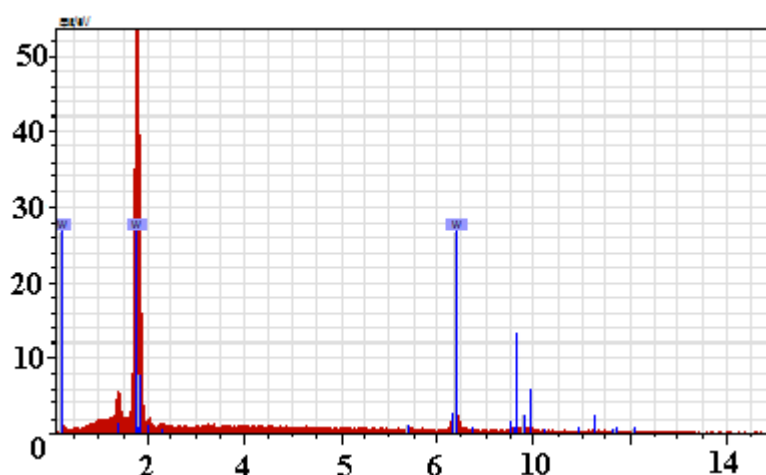
Сурет 3.19 - №2 үлгінің сәулелендірілген және сәулелендірілмеген бөліктерінің АҚМ кескіндері

Беттің кедір-бұдырлығының артуы және дөңестердің пайда болуы, бәлкім, иондық әсер ету кезіндегі беттің тозандану салдары болуы мүмкін. Бұл эффект блистерлер бетінде түзілімдер, яғни гелий толтырылған көпіршіктер және беттің қабыршақтануы байқалатын, альфа-бөлшектермен вольфрамды сәулелендірілгенмен салыстырғанда, әлдеқайда аз дәрежеде көрінетінін атап айқан жөн.

№1 сәулелендірілген үлгінің микроқаттылығын өлшеулер иондардың кеңістіктік зарядының бойлық автотербелістерінің жиілігі 15,8 МГц тең болғанда микроқаттылықтың орташа мәні 793 Н (~ 1%) дейін өскенін, ал №2 үлгі үшін (автотербелістерінің жиілігі 25,3 МГц) – 751 Н (~ 11%) дейін төмендегенін көрсетті. Бетті беріктендіру бойынша алынған нәтижелер күтпеген жағдай болды, өйткені бірқатар зерттеулерде, мысалы [91] жұмыста, осылай солғын разряд плазмасынан алынған иондармен сәулелендіру бетке жақын қабаттардағы дислокацияның пайда болуына байланысты беттің қаттылығының айтарлықтай (екі есеге дейін) ұлғаюына алып келеді. Дегенмен, сол [91,6.76] мақалада, беріктеу эффекті солғын разряд плазмасының иондарымен сәулелендіру шарттарынан, кернеуден, температурадан, сондай-ақ автотербелу жиілігінен бірқалыпты емес тәуелді екеніне баса назар аударылған.

### 3.4 Альфа-бөлшектермен сәулелендірілген вольфрамдағы газтекес қосындылардың жинақталуы және беттің деградациясы (блистеринг, флекинг)

Төмен энергетикалық альфа-бөлшектермен сәулелендірумен түрткіленген бет құрылымының өзгеруін зерделеу үшін, токамактардың дивертор пластиналарын қорғайтын ең перспективті материалдардың бірі болып табылатын, Германияда жасалған DFW маркалы ерекше таза вольфрам таңдалды. Зерттеу үшін өлшемдері 20мм × 2мм × 1мм жолақтар түріндегі вольфрам үлгілері дайындалды. BRUCKER (ЭДРА) энергия-дисперсті рентгендік талдағышпен жабдықталған HITACHI 3030 фирмасының растрлік электронды микроскопының көмегімен элементтік құрамы анықталған үлгілер іс жүзінде таза вольфрам болатындығын көрсетті, 3.20-суретте бейнеленген.



Сурет 3.20 - Сәулелендірілмеген вольфрам үлгісінің рентгендік спектрі

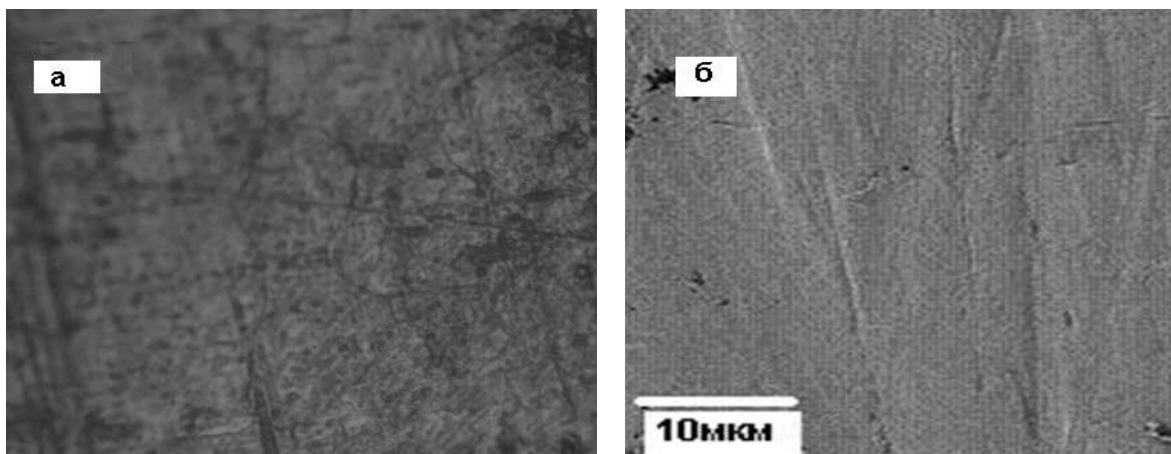
Төмен энергетикалық альфа-бөлшектермен сәулелендірілгенге дейінгі және кейінгі беттің құрылымы оптикалық металлография (ОМ), растрлік электронды микроскопия (РЭМ) және атомдық-күштік микроскопия (АКМ) әдістері көмегімен зерделенді, сондай-ақ ПМТ-3М микроқаттылықты өлшеуіш және «НАНОСКАН-КОМПАКТ» микроқаттылықты сканерлеуші аспаптарды пайдалана отырып, бетінің қаттылығы өлшенді.

Вольфрам үлгілері ЯФИ Астана филиалындағы ДЦ-60 үдеткішінің төмен энергетикалық арнасында  $^4\text{He}^{+2}$  иондарымен сәулелендірілді. Сәулелену шарттары келесілер болып табылады: альфа-бөлшектердің энергиясы - 45 кэВ, флюенсі -  $1.5 \times 10^{18} \text{ см}^{-2}$ , сәулелендіру температурасы  $\leq 200^\circ\text{C}$ . SRIM програмасының есептеулеріне сәйкес, 45 кэВ энергиялы альфа-бөлшектердің жүгіру жолдары  $\sim 100 \text{ нм}$ , страгглинг  $\sim 80 \text{ нм}$ , яғни, сәулелендірілген үлгіде гелий бетке жақын қабатта жинақталады.

Вольфрам ұнтақты металлургия әдістерімен өндірілгендіктен, үлгілердің бетін механикалық ажарлау және жылтырату қиынға түседі. Мұны ОМ және



РЭМ көмегімен алынған сәулелендіруге дейінгі беттің суреттерінен көруге болады, 3.21-суретте бейнеленген.

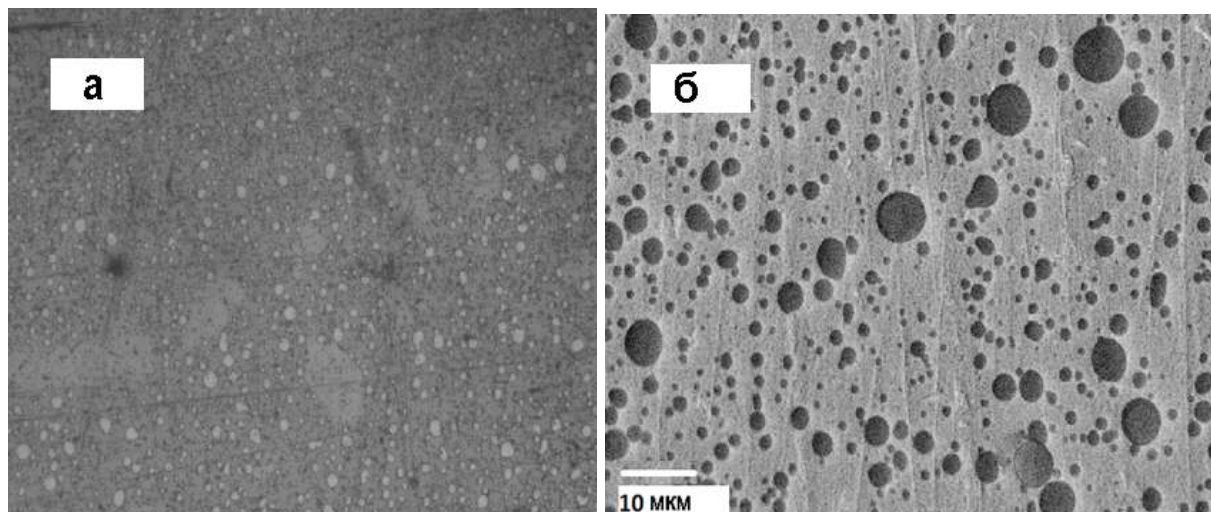


(a) – ОМ ( $\times 200$ ), (б) – РЭМ ( $\times 5\,000$ )

Сурет 3.21- Сәулелендіруге дейінгі вольфрам үлгісі бетінің кескіндері:

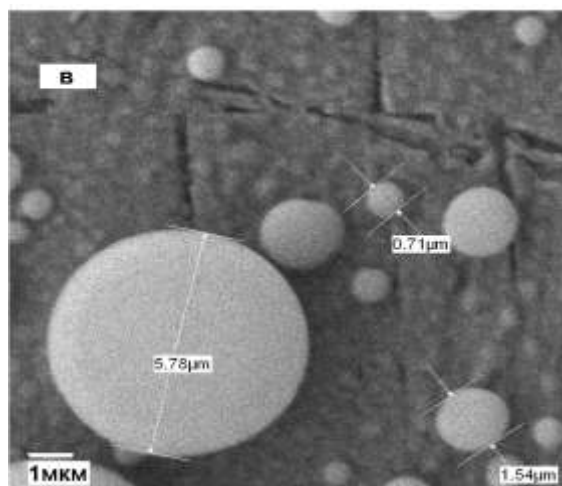
3.21 (б)-суретте келтірілген кескіндерден беттің кедір-бұдырлығының жоғары деңгейі, жолақтар көрінеді, ал 3.21 (а)-суреттегі кескінде бетті дайындау кезінде пайда болған уатылған түйіршіктердің іздері болуы мүмкін қуыстар анық көрінеді.

Вольфрам үлгілерінің альфа-бөлшектермен сәулелендірілген беттерін зерттеу бет құрылымының айтарлықтай өзгерістерін айқындады, 3.22-суретте бейнеленген.



(a) - ОМ ( $\times 200$ ), (б) – РЭМ ( $\times 1\,000$ ),

Сурет 3.22 (1) - альфа-бөлшектермен сәулелендірілген вольфрам бетінің құрылымы:

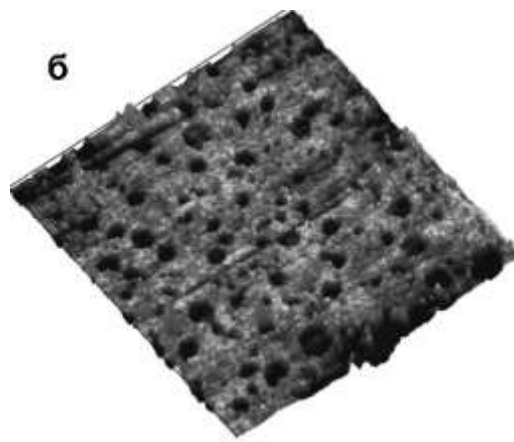
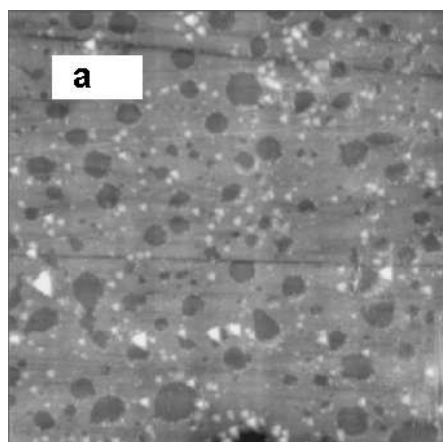


(в) – РЭМ ( $\times 20\,000$ )

Сурет 3.22 (2 жалғасы) - альфа-бөлшектермен сәулелендірілген вольфрам бетінің құрылымы:

3.22-суреттен (а) салыстырмалы түрде кішкене ұлғайтқан кездің өзінде, сәулелендірілген бетте гелийлік кеуектілік көріністері болып табылатын сфералық пішіндегі ақшыл дақтар байқалады. 3.22 (б-в)-суретте көрсетілген, РЭМ көмегімен ұлкейтіп ұлғайтылған беттің кескіндері беттегі дақтардың өлшемдері мен олардың тығыздығын бағалауға мүмкіндік береді. Беттегі сфералық түзілімдердің өлшемдері ондаған нанометрден бірнеше микрометрге дейін болады, ал олардың беттегі тығыздығы бір шаршы миллиметрде бірнеше жүзді құрайды.

АКМ әдісімен сәулелендірілген беттің құрылымын зерделеу ОМ және РЭМ зерттеулерінде анықталған сфералық түзілімдер қуыстар болатыны көрсетілді, яғни беттегі ашылған кеуектіктер, олардың диаметрі 10 мкм дейін және тереңдігі 100 нм дейін, ол вольфрамдағы энергиясы 45 кэВ болатын альфа-бөлшектердің жүгіру жолына сәйкес келеді, 3.23-суретте бейнеленген.



(а) – 2D, (б) – 3D

Сурет 3.23 - Сәулелендірілген вольфрам үлгісі бетінің АКМ кескіні.  
Сканерлеу аймағы  $80 \times 80 \text{ мкм}^2$

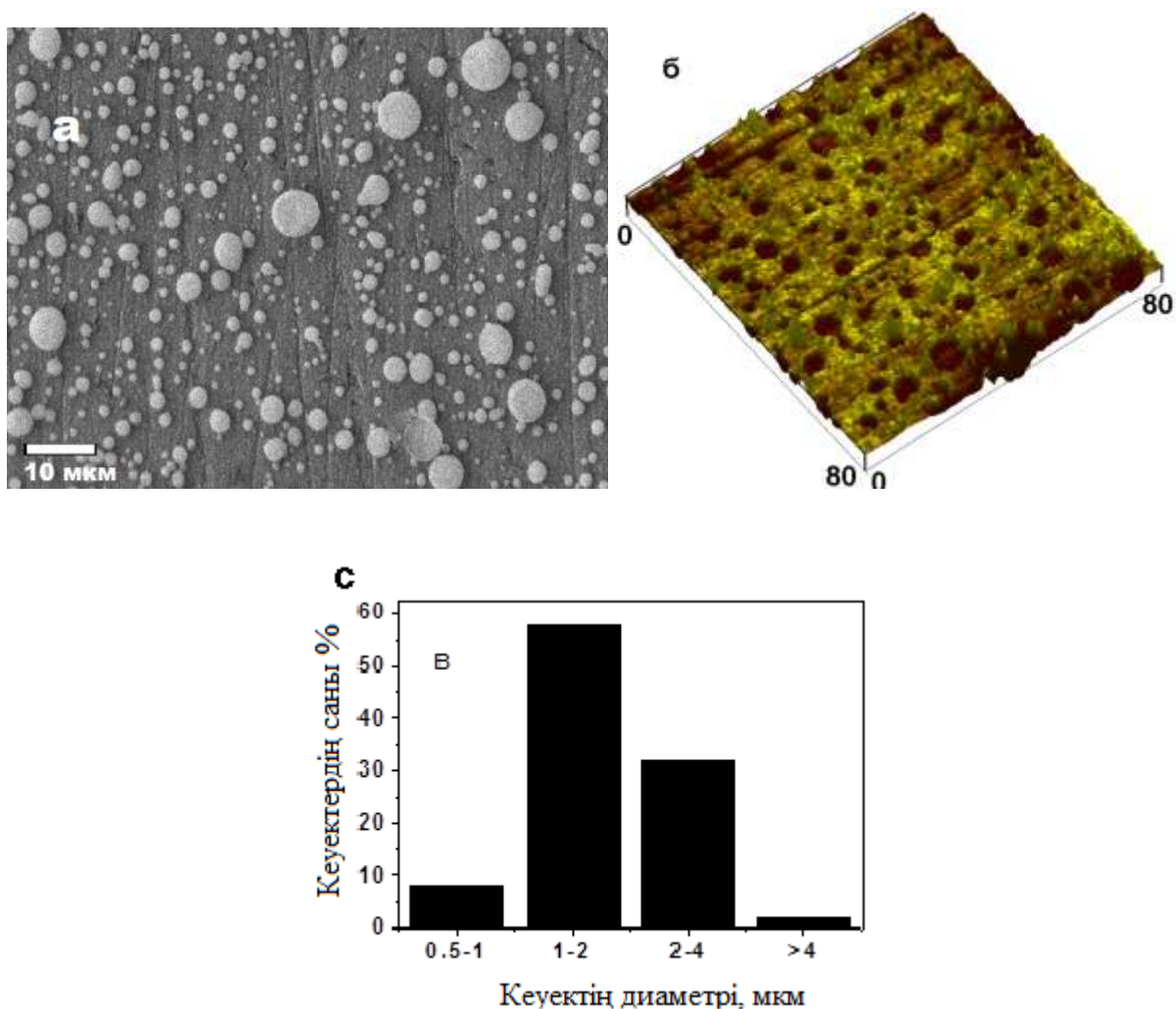
Альфа-бөлшектерімен сәулелендірілгенге дейін вольфрам үлгілерінің қаттылығы өлшенді. Микроқаттылықты өлшеулер инденторға 1.92 Н (200 г) жүктемесі бар Виккерс әдісі арқылы жүзеге асырылды, себебі 140 г – аз жүктемеде бетте із қалмайды. Наноқаттылықты өлшеуіш аспабын пайдалана отырып, наноқаттылықты өлшеу әрекеті беттің кедір-бұдырлығының жоғары деңгейіне байланысты жетістік әкелмеді. Микроқаттылықтың өлшенген мәні 1500 Мпа құрайды. Сәулелендірілген үлгілердің микроқаттылығының өлшенген мәндері  $H_{\mu}=570$  Мпа болады, ол төмен энергетикалы альфа-бөлшектерімен сәулелендіру беттің беріксізденуіне алып келетінін көрсетті.

Алынған эксперименттік нәтижелерді талдау негізінде вольфрамды төмен энергетикалық альфа-бөлшектерімен сәулелендіру кезінде гелийдің жинақталуының және шығуының келесі моделін ұсына аламыз. Сәулелендіру гелийдің жоғары шоғырлануына және страгглинг аймағында сәулелендірумен түрлендірілген бос орындардың болуына алып келеді. Гелийдің жоғары тығыздығы және бос орындар осы аймақтағы гелиямен толтырылған көпіршіктердің қарқынды қалыптасуын ынталандырады. Страгглинг аймағы бетке жақын орналасқандықтан, кеуектердегі газдың артық қысымы есебінен олар бетке қарай ауысады, яғни, блистеринг орын алады және газ толтырылған көпіршіктердің шығуы болады, яғни, бет қабыршақталады. Беттің қабыршақталуы, өз кезегінде, беріктік қасиеттерінің төмендеуіне, атап айтқанда қаттылықтың төмендеуіне әкеледі.

Төмен энергетикалық альфа-бөлшектерімен сәулелендірілген вольфрамның эффекттері бойынша эксперименттік нәтижелер 12Х18Н10Т болатты альфа-бөлшектерімен сәулелендіру бойынша біздер алған нәтижелерге сәйкес келеді [92]. Сондай-ақ, осындай  $<200^{\circ}\text{C}$  температурада  $1 \times 10^{18} \text{ см}^{-2}$  флюенске дейін 40 кэВ энергиялы альфа-бөлшектермен сәулелендірілген болат үшін де гелий көпіршіктері, блистеринг және флекинг қалыптасуы байқалады.

Беттегі сфералық түзілімдердің өлшемдері ондаған нанометрлерден бастап бірнеше микрометрлерге дейін болады, 3.24 в-суретте өлшемдері бойынша үлестірілуі көрсетілген, ал олардың беттегі тығыздығы  $\sim 1 \cdot 10^7$  кеуек/см<sup>2</sup> құрайды.



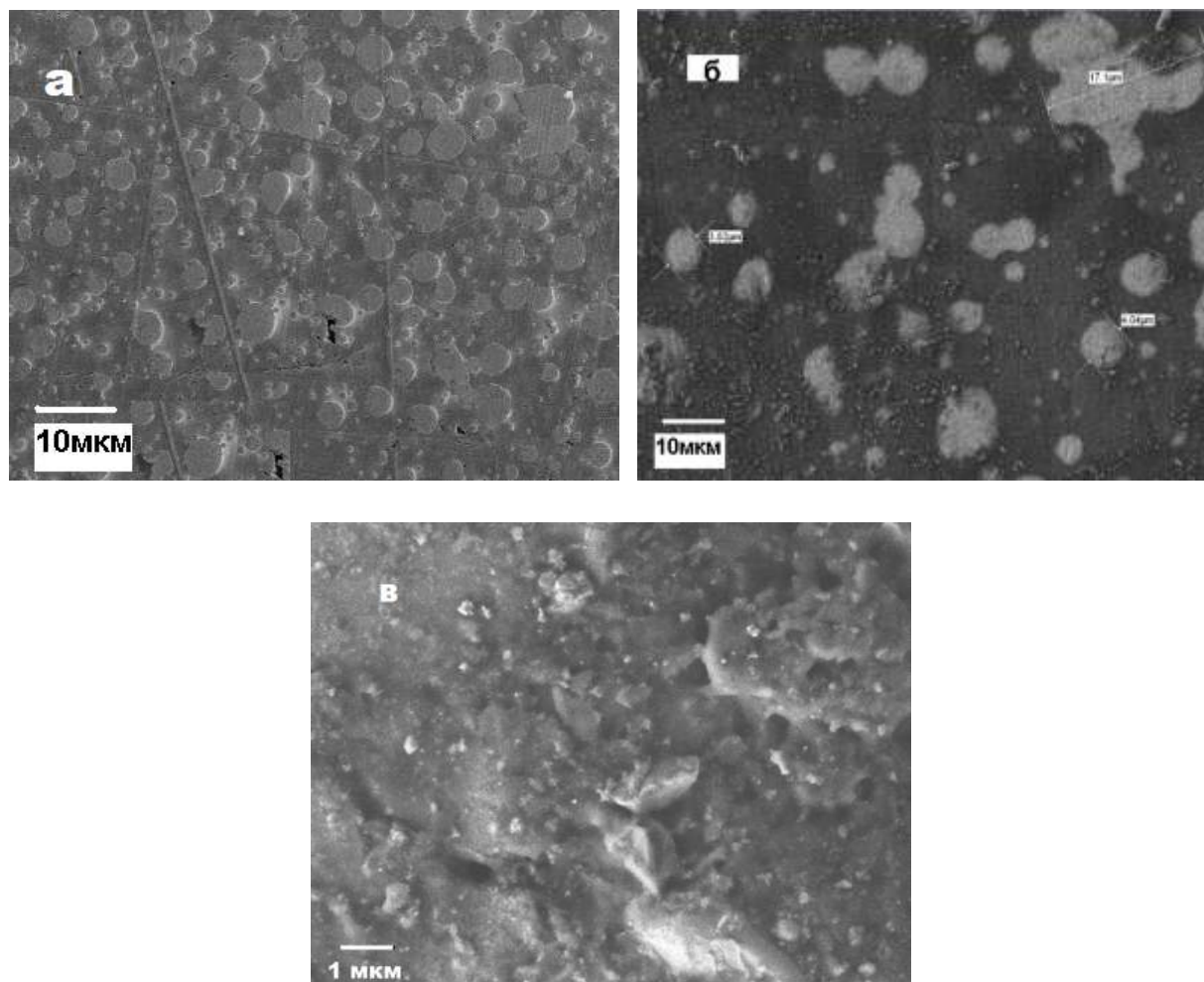


а –СЭМ кескіні, б –АКМ (80 мкм·80 мкм), с – өлшемдері бойынша үлестірімі %  
 Сурет 3.24 -  $\leq 200$  °С температурада 45 кэВ энергиялы  $1.5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$  флюенс  $\alpha$ -  
 бөлшектермен сәулелендірілгеннен кейінгі вольфрам бетінің құрылымы

3.24 а,б-суреттегі кескіндерден блистерингтен басқа флекингті байқауға болатыны көрінеді, яғни кратерлер пайда болған орында бетте газ толтырылған кеуектердің ашылуына байланысты бет қабыршақтанады. Бетке көтерілген ашық кеуектердің негізгі бөлігінің диаметрі 1 мкм көп емес. АКМ деректері бойынша кратердің тереңдігі  $\sim 100$  нм құрайды, бұл вольфрамдағы 45 кэВ энергиялы  $\alpha$ -бөлшектерінің жүгіру жолына және гелий кеуектерінің қалыптасу аймағына сәйкес келеді. Ең қарапайым бағалау, блистерлер құрамындағы гелий атомдарының саны  $1.5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$  гелий иондарын атқылаушы жалпы ағынының 20% - 25% аспайтынын көрсетті. Яғни ендірілген гелийдің негізгі бөлігі бірнеше гелий атомдарының баяу қозғалатын жиынтықтары мен қозғалмайтын гелий – бос орындар жиынтықтары түрінде материалда сақталып қалады [93-96].

Келесі кезең вольфрам үлгілерін 600 °С, 800 °С и 1000 °С температураларда 2 сағат бойы вакуумдық тізбекті күйдіруден кейінгі бет құрылымының эволюциясын зерттеу болды. Белгіленген температурада күйдіру 1 сағат ішінде жүргізілді, вакуум  $10^{-6}$  Па құрайды, салқындату пешпен бірге орындалды.

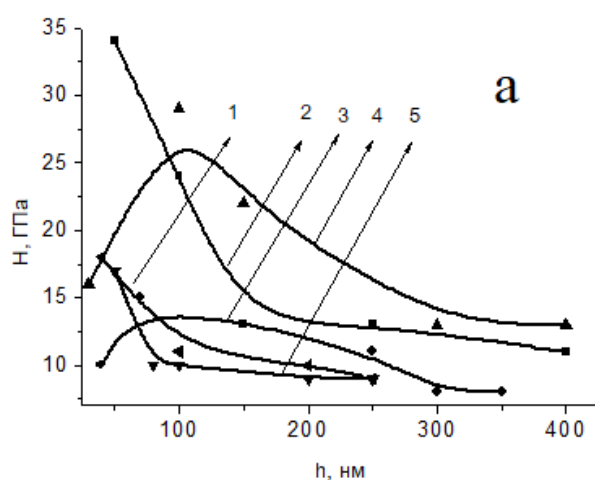
Күйдіруден кейінгі СЭМ әдісімен бет құрылымын зерттеу нәтижелері 3.25-суретте келтірілген.



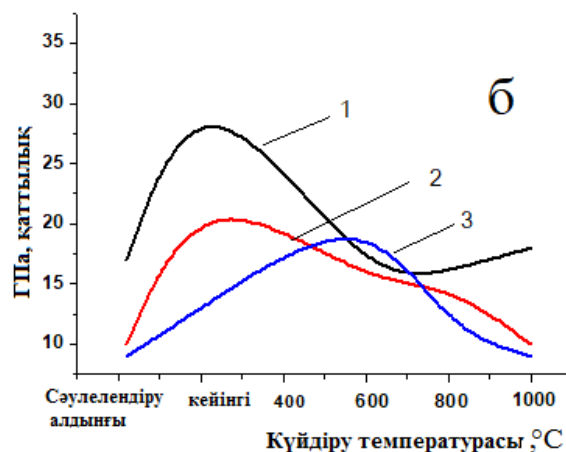
Сурет 3.25 - Альфа-бөлшектерімен сәулелендіруден кейінгі және 600 °С - (а), 800 °С - (б) и 1000 °С – (в) температураларда 2 сағаттық вакуумдық күйдіру топтамаларынан кейінгі вольфрам бетінің құрылымы.

3.25 (а)-суретте көрсетілгендей, 600°С температурада екі сағаттық күйдіру беттегі блистерлердің көлемін ұлғайтуға және олардың ашылуына алып келеді. Беттегі блистерлердің тығыздығы аз өзгерді. Келесі 800°С температурада 2 сағаттық күйдіру бет құрылымына айтарлықтай әсер етеді, 3.25 (б)-суретті қара. Кіші көлемді (<4 мкм) кеуектердің шығуы байқалмайды, бірақ бетте үлкен, өлшемдері > 4 мкм каверналар көрініп тұр, олардың кейбіреулерінің өлшемдері 17 мкм жетеді және бетке жақын орналасып біріккен кеуектердің шығуы болады. 1000 °С-да күйдіргеннен кейін бетте кеуектер (кратерлер) іздері байқалмайды, ол қалыңдығы ~ 100 нм болатын, яғни вольфрамдағы 45 кэВ энергиялы альфа-бөлшектердің проективтік жүгіру жолына сәйкес альфа-бөлшектер ендірілген қабат, бопылдақ бетке жақын қабаттың толық қабыршақтануына байланысты.

Беттің құрылымын зерттеуден басқа, сәулелендіруге дейінгі сәулелендіруден кейінгі және тізбектей күйдіруден кейінгі вольфрамның қаттылығы өлшенді.



а – Қашықтықтан бастап сәулелендірілген бетке дейін қаттылықтың тәуелділігі  
1 – сәулелендіргенге дейін, 2 - сәулелендіргеннен кейін, 3 - күйдіру 600°C, 4 - 800°C, 5 - күйдіру 1000°C.



б - Күйдіру температурасына байланысты вольфрамның қаттылығының өзгеруі:  
1-беті, 2- беттен 100 нм, 3- беттен 250 нм.

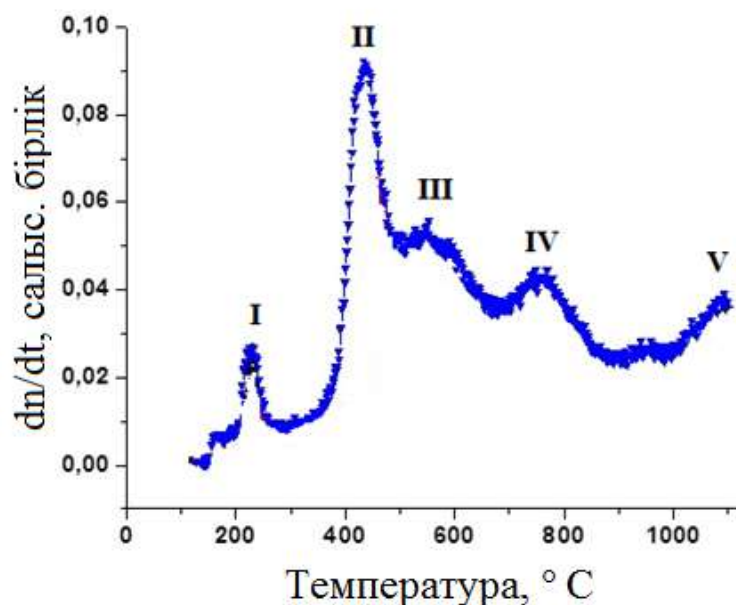
Сурет 3.26 – Альфа – бөлшектермен сәулелендіргенге дейінгі, сәулелендіргеннен кейінгі және ретті 2 сағаттық күйдіруден кейінгі вольфрам бетінің қаттылығы

Сканерлеуші наноқаттылықты өлшеуіш аспабының көмегімен беттің қаттылығын өлшеу ендірілген гелийдің және одан кейінгі күйдірудің вольфрамның беріктік қасиеттеріне әсерінің көбірек ақпараттық суреттемесін береді. «НАНОСКАН-КОМПАКТ» сканерлеуші наноқаттылықты өлшегіштегі склерометрия әдісімен өткізілген өлшеулер инденторға түсірілген жүктеменің өзгеруіне байланысты түрлі тереңдікте қаттылықты өлшеуге мүмкіндік береді. 10 мН-ге дейінгі жүктеме кезінде сәулелендірілген бетте ешқандай із қалмайды, ал жүктеменің ұлғаюымен наноқаттылықты өлшеуге мүмкіндік болады. Инденторге 100 мН тең жүктеме кезінде альфа-бөлшектердің проективтік жүгіру жолына сәйкес келетін қалыңдығы ~ 100 нм болатын қабат жаншылады. Жүктеме мен инденторге ену тереңдігін салыстыра отырып, тереңдік бойынша қаттылық туралы пікір айтуға болады. Бетті сәулелендірілгенге дейінгі қашықтықтан тәуелді қаттылықты өлшеу нәтижелері 3.26 (а,б)-суретте көрсетілген. Суретте көрсетілген тәуелділіктерден альфа-бөлшектерді ендіру ~ 30 нм бетке жақын қабаттың қаттылығының ұлғаюына алып келетіні көрініп тұр, содан кейін қаттылық төмендейді және оның мәні ~ 400 нм қашықтықта

сәулелендірілмеген вольфрамның қаттылығына тең. Бұл біздер орындаған сәулелендіру кезеңінде гелийдің жылыстауын есептеу нәтижелеріне сәйкес келеді. Түйінаралық гелий атомдарының жоғары қозғалғыштығы есебінен және ендірілген гелиймен құрылған страглинг аймағындағы кернеулердің әсерінен гелий айтарлықтай  $\sim 1$  мкм қашықтық тереңдігіне жылыстайды. Бұл сәулелендірілмегенмен салыстырғанда 300 – 400 нм тереңдікте сәулелендірілген вольфрамның қаттылығы арттыратынына байланысты. 600°C және 800°C температураларда күйдіру оның қарқынды қабыршақталуы салдарынан бетке жақын қабаты борпылдақ болады және сетінеп кетеді. Бұл оның қаттылығының төмендетумен байланысты. 1000°C температурада қоспаланған қабат толығымен қабыршақтанып кетеді және оның қаттылығы іс жүзінде сәулелендірілмеген вольфрамның қаттылығына тең болады. Қаттылықтың кейбір ұлғаюы, мүмкін, вольфрам карбидтері бөлшектерінің бетте болуына байланысты.

1000°C температурада күйдіру кезінде гелий ендірілген вольфрам қабатының эволюциясын зерттеу төмен энергетикалы альфа-бөлшектермен қоспалау блистерлердің пайда болуына және салыстырмалы сәулелендірудің төмен температурасында ( $\leq 200$  °C) беттің қабыршақталуына әкелетінін көрсетті. Күйдіру температурасының жоғарылауына қарай гелий ендірілген қабат қарқынды қабыршақталады және 1000°C температурада вольфрамдағы альфа-бөлшектердің жүгіру жолына сәйкес келетін бетке жақын қабат толығымен сетінеп кетеді. Қабыршақтану бетке жақын қабаттардың қаттылығын төмендетеді, сонымен қатар альфа-бөлшектердің жүгіру жолынан асып кететін аймақтағы қабаттардың қаттылығы артады. Бұл сәулелендіру кезеңіндегі материалдың тереңдігіне гелийдің жылыстауымен байланысты. 1000°C температурада күйдіру кезінде қаттылық сәулелендіруге дейінгі оның мәніне дейін қалпына келеді, ол гелий ендірілген қабатының толық қабыршақтануына сәйкес.

Термодесорбция эксперименттерінің нәтижесінде алынған сәулеленген вольфрамнан гелидің шығуын сипаттайтын график 3.27 суретте көрсетілген. Осы суреттен көріп отырғанымыздай гелидің термодесорбциялану спектрінің бөлме температурасынан 1100 °C дейін аралығында 5 ұш байқалады, олар: 227 °C (I), 449 °C (II), 547 °C(III), 756 °C(IV) және 1100°C(V). Не атомдарының шығуын сипаттайтын мәліметтерге интерпретация жасау үшін компьютерлік модельдеу нәтижелері қолданылды. Олар, вольфрамдағы гелиді табу формалары – көшу (миграция) энергиясы және гелий атомдарынан тұратын комплекс байланысы, сонымен қатар гелий-ваканттық комплекстегі Не атомдарының байланыс энергиясы [97-99], 3.10 және 3.11 кестелерді қараңыз.



Сурет 3.27 - 200 °С-тағы  $1.5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$  флюенске дейінге энергиясы 45 кэВ болатын альфа-бөлшектерімен соққылау кезіндегі вольфрамнан гелидің шығу тәуелділігі

| Кластердегі He атомдарының саны                    | 1    | 2    | 3    | 4    | 5     | 6     |
|----------------------------------------------------|------|------|------|------|-------|-------|
| $E_m$ , эВ                                         | 0.13 | 0.2  | 0.25 | 0.2  | 0.12  | 0.3   |
| $D_0(\times 10^{-8})$ , $\text{м}^2 \text{с}^{-1}$ | 2.95 | 3.24 | 2.26 | 1.68 | 0.520 | 0.120 |
| $E_b$ , эВ                                         |      | 1.03 | 1.18 | 1.52 | 1.64  |       |

Кесте 3.10 – Көшуді тудыратын энергия  $E_m$ , кластерлер үшін диффузия коэффициенті  $D_0$  және байланыс энергиясының He атомдары санынан тәуелділігі [97-98, б.83]

| Комплекс               | $E_b(\text{He-V})$ | $E_b(2\text{He-V})$ | $E_b(3\text{He-V})$ | $E_b(4\text{He-V})$ | $E_b(5\text{He-V})$ | $E_b(6\text{He-V})$ |
|------------------------|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Байланыс энергиясы, эВ | 4.57               | 3.11                | 3.28                | 2.61                | 1.44                | 2.08                |

Кесте 3.11 – Гелий-ваканттық комплекстегі He атомдарының байланыс энергиясы [99,б.83]

Компьютерлік моделдеу мәліметтеріне сүйенетін болсақ гелидің түйін аралық атомдары мен 1-6 атомды комплекстер қозғалғыш болып келеді. Олардың көшу энергиясы –  $0.1 \div 0.3$  эВ және олар салыстырмалы түрдегі төмен температураларда да қозғалғыш. 3.27 суреттегі төмен температуралы ұштарға I және II сәйкес келеді, оларға келесідей интерпретация жасауға болады. Бұлар бетке қарай көшетін дара атомдар және гелий атомдарынан тұратын комплекс

құрамындағылар. Бетке қарай көшкен гелий атомдары беттен дисорбцияланады немесе блистерлерге жұтылып кетеді, ізінше беттегі блистерлер санының көбейуіне және жарылуына әкеледі.

Бұл 600 °C жасыту температурасындағы бет морфологиясының өзгерісіне сәйкес келеді (3.25, а суреті), суреттен байқап отырғанымыздай беттегі блистерлердің өлшемі ұлғайған және олар жарылған. I және II сатыларындағы дисорбцияланған гелий үлесі (ұштар қоршап тұрған аудан) қарастырылып отырған температуралар аралығындағы материалдан шыққан гелидің ~ 25%-ын құрайды.

Температураға тәуелді 3.27 суреттегі үшінші ұш түйін аралық атомдардың шығуымен және олардың бетке қарай көшуімен байланысты, олардың бір бөлігі дисорбцияланады, ал тағы бір бөлігі блистерлерге жұтылады. Осы кезде имплантацияланған гелидің қандайда бір үлесі жоғары байланыс энергиясына ие орнықты гелий-ваканттық комплекс түрінде материал көлемінде қалады (2 кестені қараңыз).

Келесі жоғары температуралық сатыларда (IV және V) комплекстерден гелий атомдарының дисорбциясы орын алады және олардың бетке қарай көшуі байқалады. Бұл альфа-бөлшектің ену тереңдігіне сай келетін вольфрамның беткі қабатының бұзылуына әкеледі. Температура 1000 °C жеткен кезде қалыңдығы ~ 100 нм қабат толықтай қабыршақтанып түсіп қалады, бұл кезде беттің қаттылығы алғашқа, сәулеленбеген күйдегідей қайта қалпына келеді.

Төмен температурады ( $\leq 200$  °C) жоғары флюенске дейінгі төмен энергиялы альфа-бөлшектермен сәулелендірілген өте таза вольфрамның беткі морфологиясын, қаттылығын және термодисорбциясын зерттеу кезіндегі эксперименттер нәтижелеріне сүйене отырып гелидің жинақталу схемасы ұсынылды және оның беттің құрылымы мен механикалық қасиеттеріне әсері көрсетілді.

Төмен температуралар кезінде төмен энергиялы альфа-бөлшектермен сәулелендіру кезінде гелий атомдарының жоғары қозғалғыштығына және альфа-бөлшектердің тежелу аймағындағы күшті әсерге байланысты гелий атомдарының көшу қашықтығы жобаланған мәннен асып түседі және гелидің бірнеше атомдарынан тұратын қозғалмалы кластерлерге және гелий-ваканттық орнықты комплекстерге жиналады. Гелимен жоғары деңгейде қаныққан «страгглинг» аймағында гелимен толтырылған көпіршіктер, блистерлер пайда болады. Гелий және гелий-вакантты кластерлер тудыратын жергілікті қысым өрісі альфа-бөлшектерінің енуінің тереңдігіне сай жерде материалдың қаттылығын арттырады. Температураны 600 °C әрі қарай жоғарылату сәулеленетін беттегі блистерлердің өлшемдерінің ұлғайуына әкеледі және гелий атомдарынан тұратын қозғалғыш комплекстердің көшуі салдарынан болатын гелий десорбциясының қарқындылығын жоғарылатады. Жасыту температурасын 600 °C-тан 1000 °C-қа дейін жоғарылату кезінде қозғалмайтын гелий-ваканттық комплекстен шығатын түйін аралық гелий атомдарының жоғарылауынан альфа-бөлшектің жобаланған ену тереңдігіне сай келетін қабат толықтай бұзылады. Жасыту температурасы 1000 °C жеткен кезде қалыңдығы ~



100 нм қабат толықтай қабыршақтанып түсіп қалады және беттің қаттылығы алғашқа күйдегідей қайта қалпына келеді.

### **3.5 Протонды сәулелендірудің жоғары таза вольфрамның құрылымы мен қасиеттеріне әсері**

Бұрынырақ жоғары таза DFW вольфрамының құрылымы мен қасиеттеріне гелий иондарының әсерін зерттеген болатынбыз. Бұл бөлімдегі зерттеу жұмыстарының міндеті протондар мен альфа-бөлшектердің вольфрам қасиеттеріне әсер ету эффектілерін кейіннен вольфрамның құрылымы мен қасиеттеріне протонның әсерімен салыстыру үшін зерделеу болып табылады [100]. Есеп берудің кіріспесінде айтылғандай, бұл бөлшектердің екеуі де термоядролық реактор плазмасының құрауыштары болып табылады және ТЯР диверторы элементтерімен өзара әрекеттеседі.

Альфа-бөлшектердің әсер ету эффектілерін зерделеу кезіндегідей, вольфрам бетінің құрылымы мен беріктік қасиеттері зерттелген. Құрылым мен қасиеттерді зерттеу сканерлеуші электронды микроскопия, атомдық-күштік микроскопия және қаттылықты өлшеу әдістерімен жүргізілді.

Үлгілер, сәулелендіру және зерттеу әдістері. Зерттеу объектісі ретінде өте таза DF-Wвольфрам (99.97 вес.%) таңдалып алынды. Үлгіні дайындау өлшемдері 10 мм × 10 мм × 1 мм пластиналарды жасауды қамтиды, сонан соң стандартты процедуралар, атап айтқанда қажағыш қағаз бөлшектерінің мөлшерін бірте-бірте азайту және МОИ пастасын пайдалана отырып матамен жылтырату арқылы механикалық ажарлау орындалады.

Алматы қ. ЯФИ У КП-2-1 үдеткішінде вольфрам үлгілерін бөлме температурасында  $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$  және  $10^{17} \text{ см}^{-2}$  флюенстерге дейін 1 МэВ энергиялы протондармен сәулелендіру орындалды. SRIM есептеулеріне сәйкес вольфрамдағы 1 МэВ энергиялы протондардың проективтік жүгіру жолы ~ 6 мкм, страгглингі – 0.65 мкм, яғни сутегі сәулелендірілген беттен жеткілікті үлкен қашықтықта орналасыды.

Протондық сәулелендіруге дейін және кейін вольфрамның бастапқы үлгілері бетінің құрылымы мен қасиеттері сәулелендірілген материалдың осындай қасиеттерімен салыстыру үшін анықталды.

Келесі сипаттамалар анықталды:

- Үлгілер салмағы;
- Рентген-фазалық талдау әдістерімен кристалдық құрылымы;
- Сканерлеуші және атомдық-күштік микроскоптың көмегімен беттің құрылымы мен элементтік құрамы;
- Микроқаттылық;
- Беттің кедір-бұдырлығы.

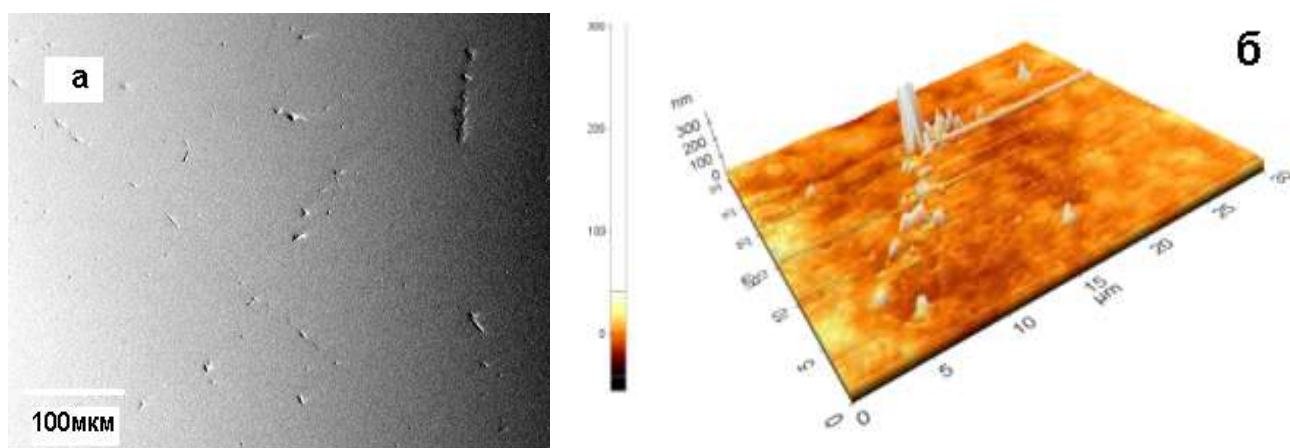
Сәулелендіруге дейінгі вольфрамның құрылымы мен қасиеттері. Вольфрамның кристалдық құрылымы тор тұрақтысы  $a = 3.1707 \text{ Å}$  және кристалдық тор өте жоғары дәрежелі жетілдірілген КЦК тор болып табылады, дифрактограммасы 3.28-суретте көрсетілгенге ұқсас, өйткені DF-W вольфрамның бір топтамасының үлгілері зерттелді.

Радиациялық әсерге дейінгі және кейінгі вольфрам үлгілерін өлшеу нәтижелері 3.12-кестеде ұсынылған.

| Үлгінің №  | 1                    |                       | 2                    |                       |
|------------|----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|
|            | Сәулелендіруге дейін | Сәулелендіруден кейін | Сәулелендіруге дейін | Сәулелендіруден кейін |
| Салмағы, г | 4.738                | 4.474                 | 4.161                | 4.161                 |

Кесте 3.12 – Протондық сәулелендіруге дейінгі және кейінгі вольфрам үлгілерінің салмағы.

Сәулелендіруге дейінгі вольфрам бетінің СЭМ және АҚМ кескіндерінен (3.28-сурет) жеке шыңдарды қоспағанда, бет жеткілікті тегіс екені көрінеді.

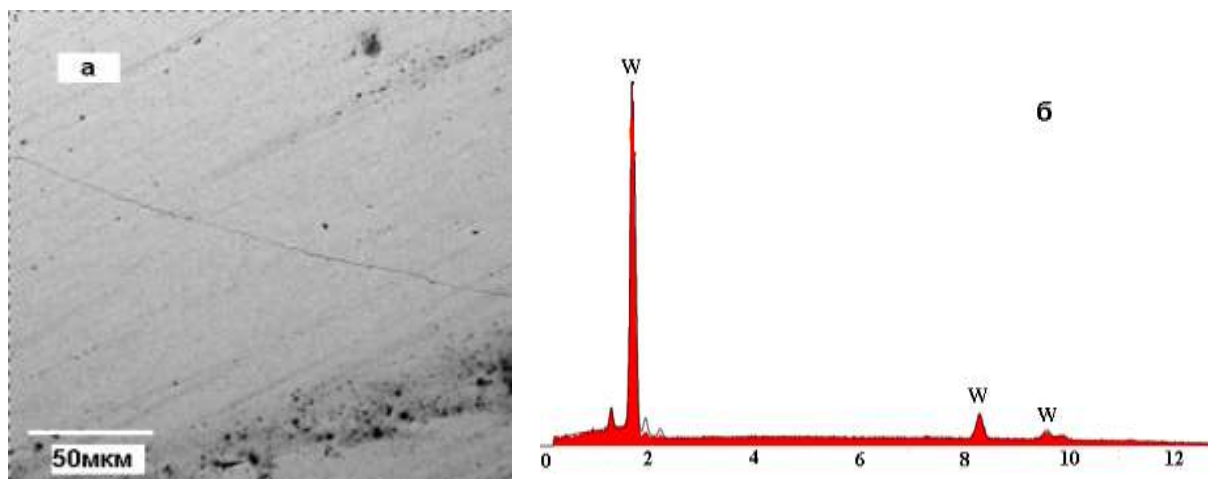


а – СЭМ; б – беттің АҚМ кескіні.

Сурет 3.28 - Протондық сәулелендіруге дейінгі вольфрам бетінің құрылымы

ЭДРТ пайдалана отырып анықталған вольфрам үлгілерінің элементтік құрамы (3.29-сурет) вольфрамның жоғары тазалығын растайды. Протондық сәулелендіруге дейін вольфрамның микроқаттылығының орташа мәні 650 Мпа құрайды.





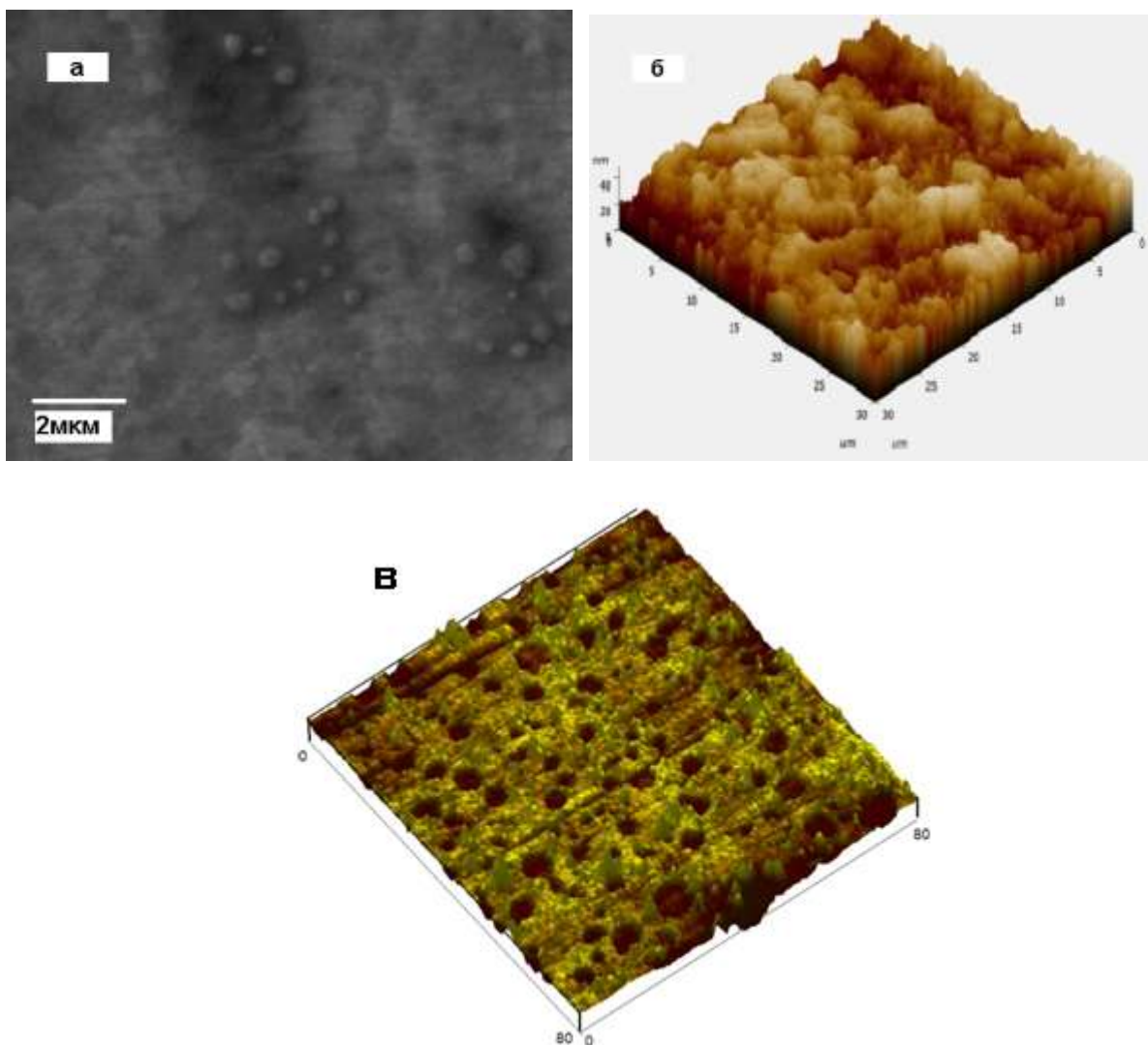
а - вольфрам үлгісі бетінің кескіні; б - рентгендік спектр.  
 Сурет 3.29 – Сәулелендіруге дейінгі вольфрам бетін элементтік талдау нәтижесі

Протондық сәулелендіруден кейінгі вольфрамның құрылымы мен қасиеттеріне жүргізілген зерттеулер,  $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$  флюенске дейін сәулелендіру кезінде вольфрамның бетінің не құрылымына, не қасиеттеріне іс жүзінде әсерін тигізбеді. Протондармен атқылау арқасында эрозиядан туындаған беттің кедір-бұдырлығының дәрежесі артқанын ғана атап өтуге болады, бірақ масса шығынының шамалығы себебінен өлшеу әдісімен эрозия шамасын өлшеу мүмкін емес. Сонымен қатар, беттің микроқаттылығы  $\sim 8-10\%$  -ға артты.

Бет құрылымында да, оның беріктігінде да едәуір өзгерістер  $10^{17} \text{ см}^{-2}$  сәулелену флюенсі кезінде байқалады. Ең алдымен, бетте дөңгелек пішінді төмпешіктер пайда болды, оларды бетүсті қабаттарында газ кеуектілігінің көрінісі ретінде түсіндіру мүмкін (3.30,а-сурет). Беттің кедір-бұдырлығы едәуір өсті (3.30,б-сурет). Беттің микроқаттылығы  $\sim 22\%$  анағұрлым өсті.

Осы жұмыста алынған нәтижелерді вольфрамды альфа-бөлшектермен сәулелендіру бойынша бұрын алынған нәтижелерді салыстыра отырып, альфа-бөлшектер вольфрамның құрылымы мен қасиеттерінің өзгеруіне анағұрлым көп әсер ететінін атап өткен жөн (3.30, в -сурет).

3.30-суретте көрсетілгендей, альфа-бөлшектермен ұқсас флюенстерге дейін сәулелендіру вольфрам бетін блистерингке және флекингке әкеледі. Беттің микроқаттылығы да едәуір өзгерді, бірақ протонды сәулелендіруден айырмашылығы микроқаттылық ұлғайған жоқ, ал  $\sim 3$  есе азайды, бұл гелиймен толтырылған кеуектердің бетке ашылуымен түсіндіріледі.



а – СЭМ; б – протондармен сәулелендірілгеннен кейінгі АҚМ; в – альфа-бөлшектермен сәулелендірілген вольфрам бетінің АҚМ кескіні.  
 Сурет 3.30 –  $10^{17} \text{ см}^{-2}$  флюенске дейін 1 МэВ энергиялы протондармен және 45 кэВ энергиялы альфа-бөлшектермен сәулелендірілгеннен кейін вольфрам бетінің құрылымы

Солғын разряд плазмадан алынған иондармен сәулелендірілген вольфрамның орындалған зерттеулерінің нәтижелері бойынша келесі қорытынды жасауға болады:

-Қалдық газдардың солқын разряд плазмасынан алынған иондардың кеңістіктік зарядының бойлық автотербелістердің импульстік әсері беттің иондық тозаңдату эффектілерімен байланысты беттің кедір-бұдырлық дәрежесінің ұлғаюынан тұратын бет морфологиясының едәуір өзгеруіне әкеледі.

-15.8 МГц тең иондардың кеңістіктік зарядының бойлық автотербелістерінің жиілігі кезінде микроқаттылықтың орташа мәні іс жүзінде өзгерген жоқ (1% ~ ұлғаюы). 25.3 МГц тең иондардың кеңістіктік зарядының бойлық автотербелістерінің жиілігі кезінде микроқаттылықтың орташа мәні 11% - ға төмендеді.

Протондармен және альфа-бөлшектермен сәулелендірілген вольфрамның орындалған зерттеулерінің нәтижелері бойынша келесі қорытынды жасауға болады:

Протондармен  $5 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$  флюенске дейін сәулелендіру бет құрылымына аз әсер етеді, сондай-ақ микроқаттылықтың шамасы іс жүзінде өзгермейді.  $10^{17} \text{ см}^{-2}$  сәулелендіру флюенсі кезінде ретсіз үлестірілген төмпешіктер бетте пайда болады, ал микроқаттылық 22% - ға артады.

Протондармен және альфа-бөлшектермен сәулелендіру эффектілерін салыстыру альфа-бөлшектермен сәулелендіру бет құрылымының және механикалық қасиеттерінің анағұрлым үлкен өзгерістер тудыратынын көрсетті. Бетте осындай флюенстерге дейін альфа-бөлшектермен сәулелендіру кезінде блистеринг және флекинг байқалады, ал беттің қаттылығы екі еседен артық артады.

### **3.6 Иондық сәулелендіру кезінде графитті тозаңдату коэффициентін экспериментті өлшеу**

Графиттің тозаңдату коэффициентін зерттеу үшін көлемі 20 мм×20 мм және қалыңдығы ~ 1 мм болатын графит үлгілері дайындалған болатын. Қазіргі уақытта өнеркәсіптің әртүрлі салаларында қолдану үшін графиттердің әртүрлі маркалары әзірленген. Графитті тозаңдату ДЦ-60 үдеткішінде үстіңгі бетке иондық шоқтың құлауының қалыпты бұрышында 100 кэВ энергиялы Аг иондарымен орындалды. Беттің тозаңдануы есебінен массаның шығыны ОНАУС аналитикалық таразыда  $\pm 0.1$  мг. өлшеу дәлдігімен өлшенді.

Графит бетінің тозаңдату коэффициентін есептеу салмақтау әдісімен өлшенген салмақ шығынының деректері бойынша орындалған. Салмақтау әдісінің дәлдігі РКШ әдісімен орындалған салмақ шығынының өлшеулеріне едәуір жол беретінін атап өткен жөн. Графит үшін  $K_s$  анықтаудың нәтижелері, сондай-ақ сәулелендіруге дейін және сәулелендіруден кейін графит үлгілерінің салмағы 3.12-кестеде келтірілген. Сонымен қатар  $K_s$  есебі мынадай формула бойынша жүргізілді:

$$K_s = N_{sa}/\Phi \quad (3.14)$$

мұнда  $N_{sa}$  – тозаңдалған атомдардың саны,  $\Phi$ - атқылаушы иондардың флюенсі.  $N_{sa} = N_A \times \rho \times V/A$ , мұнда  $N_A$  -Авогадро саны  $0.6 \times 10^{24}$  ат./ моль;

$\Phi = 5 \times 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup> флюенсі кезінде аргонның атқылаушы иондарының саны және  $S = 2.6 \text{ см}^2$  графиттің сәулеленетін бетінің ауданы –  $1.3 \cdot 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup> құрады,  $1 \cdot 10^{18}$  ион/см<sup>2</sup> флюенсі кезінде аргонның түсуші иондарының саны  $2.6 \cdot 10^{18}$  ион/см<sup>2</sup> құрайды.  $N_{sa}$  тозаңдалған атомдарының саны мына формула бойынша бағаланды:

$$N_{sa} = \Delta m / (M_{AEM} \times A) \quad (3.15)$$

мұнда  $M_{\text{АЕМ}}$  – массаның атом бірлігінің грамындағы массасы,  $M = 1.66 \times 10^{-24}$  г, А-салыстырмалы атом массасы,  $A = 12$  көміртек үшін.

3.13 -кестесіндегі келтірілген  $K_s$  мәндерінен  $5 \times 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup> флюенсі кезінде алынған тозаңдату коэффициенті  $1 \times 10^{18}$  ион/см<sup>2</sup> флюенсі кезінде алынған тозаңдату коэффициентінен екі есе жоғары екені көрінеді, бұл атқылаушы иондар флюенсінен  $K_s$  тәуелділігі туралы жалпы қабылданған түсініктермен сәйкес келмейді. Мұның себебі, өлшеу дәлдігінің жеткіліксіз болуы мүмкін. Алайда, басқа авторлардың эксперименттік нәтижелерімен тозаңдату коэффициентінің алынған бағаларын салыстыру  $K_s \sim 2-2,5$  / ион (осы жұмыста алынған сәулеленудің екі флюенсі үшін  $K_s$  орташа мәні), шамасы,  $K_s$  нақты мәніне сәйкес келетінін көрсетеді[77,б.56].

| Үлгі №                                                                                | флюенс $5 \cdot 10^{17}$ см <sup>-2</sup><br>( $1.3 \cdot 10^{17}$ , $S = 2.6$ см <sup>2</sup> ) | флюенс $1 \times 10^{18}$ см <sup>-2</sup><br>( $2.6 \cdot 10^{18}$ , $S = 2.6$ см <sup>2</sup> ) | Басқа<br>авторлардың<br>нәтижелері* |
|---------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| Салмағы<br>(сәулелендіру<br>ге дейінгі), г                                            | 0.6702                                                                                           | 0.7986                                                                                            |                                     |
| Салмағы,<br>(сәулелендіру<br>ден кейінгі), г                                          | 0.6701                                                                                           | 0,7985                                                                                            |                                     |
| $K_s$                                                                                 | 3.8                                                                                              | 1.9                                                                                               | 3                                   |
| *[82,б.60] сілтеме, (10 кэВ Ar+ иондар), графит маркасы (көміртегі)<br>көрсетілмеген. |                                                                                                  |                                                                                                   |                                     |

Кесте 3.13 - 100 кэВ энергиялы аргонның бес разрядты иондарымен сәулелендіруге дейін және кейін графит үлгілерінің салмағы және графиттің тозаңдату коэффициенті

Басқа авторлардың [101] нәтижелеріне сәйкес  $K_s$  энергияға тәуелділігі үшін Ar (0.5 – 10 кэВ) иондарының энергиялары аралығында тозаңдалған атомдар санының бір сарынды өсуі тән және Ar  $\sim 6-10$  кэВ иондарының энергиясы кезінде  $K_s \sim 3$  ат/ион құрайды. Ar  $\sim 30-40$  кэВ иондарының энергиясы кезінде  $K_s$  максималды мәнге жетеді және одан әрі иондардың энергиясының өсуімен бір сарынды азаяды. Бұл графиттегі иондар жүгірісінің өсуімен байланысты және сәйкесінше тозаңдалған атомдардың шығуы төмендейді. Осылайша,  $K_s \sim 2-2,5$  ат./ион мәні 100 кэВ энергиялы Ar иондары үшін нақты түрде ұсынылады. Сонымен қатар, осы зерттеуде аргонның түсуші иондарының энергиясына  $K_s$  тәуелділігін салмақтау әдісінің жеткіліксіз дәлдігінің салдарынан анықталмағанын атап өткен жөн.

Қорытындылар. Бұл жұмыста вольфрамды келешекті диверторының тақтасы ретінде қолдануға болатынын нақты айтуға болады. Себебі, екі материалды салыстырғанда, графиттің физикалық тозаңдануы вольфрамға карағанда  $1/3$  есе жоғары тозаңданады. Графиттің вольфрамнан

айырмашылығы, сутегі бар ұшпа қосылыстардың пайда болуына байланысты химиялық тозаңдануға ұшырайды, ал графитты диверсаторлы плиталар үшін материал ретінде пайдалану кезінде плазманы ластауы мүмкін. Вольфрамның диверторымен салыстырғанда елеулі болады.

### **3.7 Плазма ағындарымен импульстік сәулелендірілген графит бетінің эрозиясы және құрылымы**

Импульстік плазмалық сәулелену кезінде графит массасының жоғалуын экспериментальды өлшеу[102-104].

Зерттеу үшін қазіргі уақытта реактор жасауда кеңінен пайдаланылатын графиттердің жаңа буыны болып табылатын APB маркалы графит таңдалған болатын. Графиттің осы маркасының физика-механикалық қасиеттерінің негізгі сипаттамалары 3.14-кестеде келтірілген. Шомбал тілкемнен кесілген поликристалды графиттің төрт үлгісі дайындалған. Үлгілер өлшемі 10 мм 10 мм × 0.5мм параллелепипед пішінді болды. Кесуден кейін үлгілер тегістеуге және механикалық жылтыратуға түсірілді. Плазманың импульстік ағындарымен сәулелендіргенге дейін үлгілер OHAUS аналитикалық таразыда өлшенді, өлшеу дәлдігі  $\pm 0.1$  мг. құрады. Сонымен қатар осы үлгілердің құрылымы мен қасиеттеріне зерттеу жүргізілді және рентгенфлуоресценттік талдау (РФТ) әдісімен элементтік құрамы анықталды. РФТ мәліметтері бойынша көміртегі 99.9 ат құрайды, қоспалық элементтердің құрамы аз, осылай хромның құрамы 0.002 ат. %, мыс-0.02 ат.%, мырыш-0.005 ат.%. аспайды. Плазманың импульстік ағындарымен сәулелендірілгенге дейін рентгендік құрылымдық талдау әдісімен APB графиттің кристалдық құрылымын анықтау жүргізілді және оның гексагоналды құрылымы бар екені анықталды. Плазманың импульстік ағындарымен сәулелендірілгендегі графиттің кристалдық құрылымы болмашы өзгеретінін ескереміз. Плазмалық сәулеленудің эффектілерін анықтау үшін сәулеленуге дейін және сәулеленуден кейін дайындалған үлгілер бетінің құрылымы Quanta 3d 200i электрондық микроскопта сканерлеуші электрондық микроскопия және Solver spectrum NT-MDT микроскопында атомдық-күш микроскопия әдістерімен зерттелді.

Импульстік плазмамен сәулелендіргенге дейін және одан кейін беттің құрылымын зерттеумен қатар аналитикалық таразыда үлгілердің салмағы өлшенді, 3.14-кестені қараңыз.

| Физикалық параметрлері | Белгісі, Өлшеу бірлігі                                | Мәні               |
|------------------------|-------------------------------------------------------|--------------------|
| Балқу температурасы,   | $T_{\text{бал}}, \text{K}$                            | 4000               |
| Атом массасы,          | $m_A, \text{a.e.m}$                                   | 512                |
| Тығыздығы,             | $\rho, \text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$                   | $1.69 \times 10^3$ |
| Жылу өткізгіштік       | $k, \text{Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$    | 55                 |
| Булану энтальпиясы     | $\Delta H_{\text{бул}}, \text{Дж}\cdot\text{кг}^{-1}$ | $6.0 \times 10^7$  |
| Қаралық дәрежесі       | $\epsilon, \text{салыс. бірл.}$                       | 0.86               |
| Қысуға беріктігі       | $\sigma_B, \text{МПа}$                                | 24.5-29.4 МПа      |
| Юнга Модулі            | $E, \text{МПа}$                                       | 7.8 ГПа            |

Кесте 3.14- APB маркалы графиттің физика- механикалық қасиеттері [105-106]

Беттің құрылымын зерттеуден және өлшеуден кейін графиттің дайындалған үлгілерін сәулелендіру Әл-Фараби атын. ҚазҰУ импульстік плазмалық үдеткішінде орындалды. № 1-4 үлгілерін сәулелендіру шарттары 3.14-кестеде келтірілген. № 1 және № 2 үлгілері әрқайсысы импульстер арасындағы аралығы 10 минуттан көп емес ұзақтығы  $\sim 2$  мкс он үш импульспен сәулелендірілген. № 3 және № 4 үлгілер ұзақтығы  $\sim 250$  с 5 импульспен сәулелендірілген, сондай-ақ импульстер арасындағы аралық 10 минуттан кем емес болды. № 1-2 үлгілердің сәулеленуінің № 3-4 үлгілерін сәулелендіруден елеулі айырмашылығы импульстің ұзақтығынан басқа бір импульс үшін беттегі энергия шығару болып табылады, 3.14-кестені қараңыз.

| № | Сәулелендіруге дейінгі салмағы, г | U, кВ | Импульстің ұзақтығы, мкс | P, мм рт.ст. | Q, Дж/см <sup>2</sup> | Импульс тер саны | Сәулелендіруден кейінгі салмағы, г | Масса шығыны, г |
|---|-----------------------------------|-------|--------------------------|--------------|-----------------------|------------------|------------------------------------|-----------------|
| 1 | 0,772                             | 5     | 2-3                      | 2.7          | 10                    | 13               | 0,768                              | 0,004           |
| 2 | 0,811                             | 5     | 2-3                      | 2.7          | 10                    | 13               | 0,810                              | 0,001           |
| 3 | 0,865                             | 12    | 250-300                  | 2.7          | 8                     | 4                | 0,865                              | 0               |
| 4 | 0,844                             | 12    | 250-300                  | 2.9          | 8,3                   | 4                | 0,844                              | 0               |

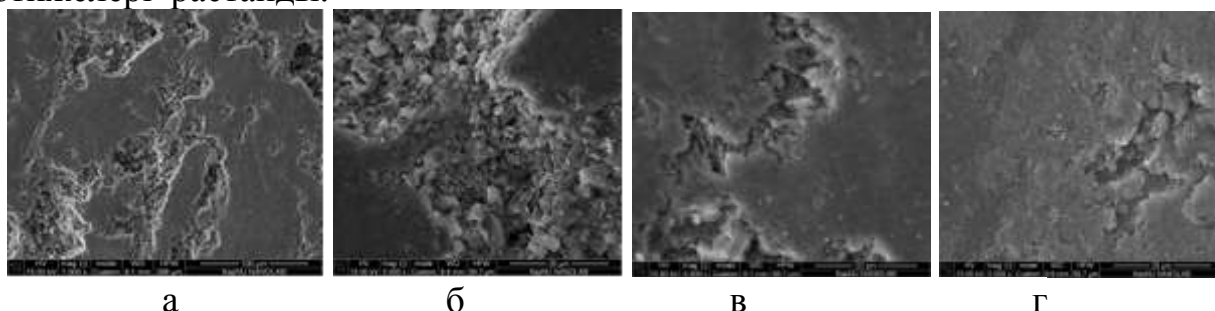
Кесте 3.15 - Графиттің сәулелендірілмеген және сәулелендірілген үлгілерінің өлшеу нәтижелері және плазманың импульстік ағындарымен сәулелендіру шарттары.

Импульстік плазмалық сәулелендірудің әсерінен термиялық эрозияның эффектілері 3.14-кестеде келтірілген бұл графит үлгілерінің салмағын өлшеу нәтижелерінен көрінеді. Салмақ шығынының  $10 \text{ Дж/см}^2$  бетінде энергия шығарумен ұзақтығы  $\sim 2.5$  мкс 13 импульспен сәулелендірілген үлгілерге кесте деректерінен №1 және №2 үлгілер үшін салмақ шығыны сәйкесінше 4 мг және

1 мг құратынын атап өткен жөн. Өлшенген салмақ шығыны мәндеріндегі айырмашылық бет құрылымының бастапқы (дайындағаннан кейін) айырмашылықтарымен байланысты. Импульс үшін  $10 \text{ Дж/см}^2$  энергия шығарумен он үш 2 мкс импульстермен сәулелендірілген масса шығынының орташа мәні  $\sim 2.5 \text{ мкг}$  импульсті құрады.

$8 \text{ Дж/см}^2$  бетінде энергия шығаруымен бес 250 мкс импульстермен сәулелендіру 1-кестеде көрсетілгендей графит салмағының шығынына әкелмеді.

№1-4 үлгілерін импульстік плазмамен сәулелендіргенге дейінгі және кейінгі графит бетінің құрылымын зерттеу, 3.31 а-г суреттерін қараңыз, өлшеу нәтижелері растайды.



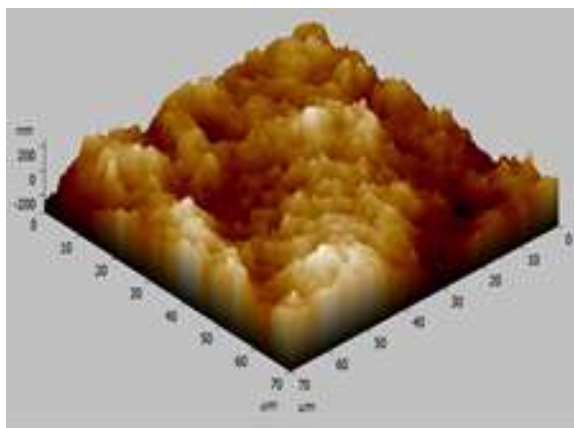
Сурет 3.31 – графит бетінің РЭМ суреттері: а – сәулелендіргенге дейінгі №1 үлгі, б – ұзақтығы 2 мкс плазма импульстерімен сәулелендіруден кейінгі №1 үлгі, в – сәулелендіргенге дейінгі №3 үлгі, в - ұзақтығы 250 мкс плазма импульстерімен сәулелендіруден кейін. Ұлғаюы  $\times 5\,000$

3.31(а) және 3.31 (б) суреттегі бет кескіндерін салыстырудан көрініп тұрғандай, ұзақтығы 2 мкс плазманың он үш импульсімен сәулелендіру бет құрылымының елеулі өзгеруіне әкелді. 3.31 (б)-суретте сәулелену әсерінің іздері анық байқалады, ал бет құрылымының беті ұзақтығы 250 төрт импульспен сәулелендіруден кейін шамалы ғана өзгерді, 3.31 (в) және 3.31 (г) суреттерін қараңыз. Шамасы,  $8 \text{ Дж/см}^2$  энергия шығару беттен көміртегі атомдарының елеулі сублимациясы үшін жеткіліксіз. Импульс үшін 2 мкс ұзақтығымен  $10 \text{ кДж/см}^2$  энергия шығаруымен плазманың он үш импульстік ағындарының әсеріне ұшыраған графиттің бетін АҚМ әдісімен зерттеу сәулеленетін беттен көміртек атомдарының сублимациясы нәтижесінде беттің тегістелуі байқалатынын көрсетті, 3.32 (а, б)-суретті қараңыз. Графит үлгісінің бет құрылымы ұзақтығы 250 мкс және  $8 \text{ Дж/см}^2$  энергия шығаруымен плазманың төрт импульсімен сәулелендіргенге дейін және кейін іс жүзінде өзгерген жоқ.

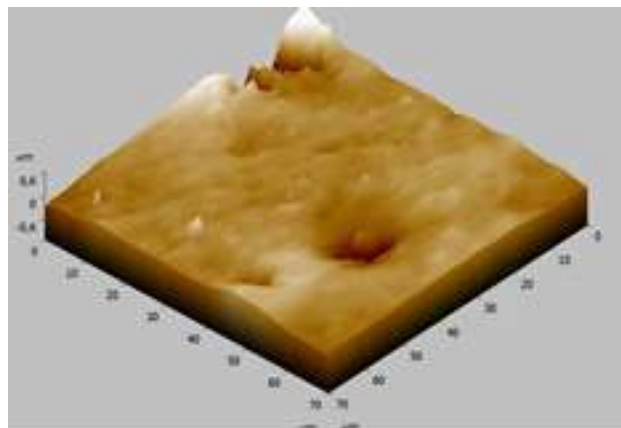
Массаның шығынын және бет құрылымының эксперименттік зерттеулеріне қорытынды жасай отырып, графитті плазманың импульстік ағындарымен сәулелендіру импульс пен импульстер санына энергия шығарудың белгілі ара қатынасы кезінде массаның шығынына және бет құрылымының өзгеруіне әкеп соқтыруы мүмкін. Осылайша, импульс үшін  $10 \text{ кДж/см}^2$  энергия шығаруы, 13 импульс кезінде ұзақтығы 2-3 мкс массаның



шығынының және беттің тегістелу эффектілері байқалады. Импульс үшін 8 Дж/см<sup>2</sup> энергия шығаруы кезінде массаның шығынынан ұзақтығы ~ 250 с 4 импульс үшін 0.0001 мг (өлшеу дәлдігі) аспайды, яғни сәулеленетін беттен графиттің елеулі булануы болмайды. СЭМ және АҚМ бет құрылымын зерттеу бет құрылымының елеулі өзгерістері іс жүзінде жоқ - өлшеу нәтижелерін растайды.



а



б

а – сәулелендіруге дейінгі

№1 үлгі, б –ұзақтығы 2 мкс 13 плазма импульстерімен сәулелендіруден кейінгі

Сурет 3.32 – сәулелендіру графит бетінің АҚМ кескіндері

Плазманың импульстік ағындарымен сәулелендіру кезінде графит массасының шығынын есептеу [83,б.61].

Плазманың импульстік ағындарымен сәулелендіру кезінде сәулеленетін бетінен массаның шығыны графит атомдарының сублимациясы есебінен жүргізіледі. Масса шығынын есептеу екі кезеңде жүргізіледі. Бірінші кезеңде фазалық түрленуді (қатты дене - газ) және сәулеленетін беттің жылу сәулеленуін есепке ала отырып, жылу өткізгіштік теңдеулері шешіледі:

$$\rho \cdot C_p \cdot \partial T / \partial t = k \Delta T + (J + J_{ev} + \varepsilon \cdot \sigma_{SB} \cdot (T - T_{am})^4)_{айм} \quad (3.16)$$

мұнда  $\rho$  – графиттің тығыздығы,  $C_p$  – меншікті жылу сыйымдылығы,  $k$  – жылу өткізгіштігі,  $J$  – сәулеленумен енгізілетін энергия ағыны,  $J_{ev}$  – сублимация есебінен беттен шығарылатын энергия ағыны,  $\sigma_{SB}$  – Стефан Больцман тұрақтысы,  $T$  – графит температурасы,  $T_{am}$  – қоршаған орта температурасы. Модельде графиттің балқуы ескерілмеген, өйткені әдебиетте жылу терісінің әсері кезінде графиттің балқуы жылыту жағдайына байланысты және өте сирек байқалатыны белгіленген.

Импульстік плазмамен сәулелендіру (сәулеленетін беттің ауданы 10 мм × 10 мм, қалыңдығы 5 мм) бойынша экспериментте үлгінің өлшемдеріне сәйкес келетін сәулеленетін графиттің берілген геометриясы үшін соңғы элементтер

әдісімен сандық есептеулер нәтижелері бойынша уақытқа байланысты материалдың тереңдігі бойынша температуралардың үлестірілімі анықталды.

Графит үшін (3.16) теңдеу есептерінде пайдаланылатын параметрлер 3.14-кестеде келтірілген.

Қатты фазада  $C_p$  графиттің жылу сыйымдылығы өрнектермен берілген [82,б.60]:

$T \leq 3200\text{K}$  кезінде  $T > 3200\text{K}$ ,  $C_p(T) = C_p(3200)$  кезінде мына формуламен үлеседі.

$$C_p(T) = 4.18 \cdot (0.44391 + 0.30795 \cdot 10^{-4} \cdot T - 61257/T^2 + 0.10795 \cdot 10^8/T^3) \quad (3.17)$$

Дегенмен (3.17) сәйкес, 3200 К температурадан жоғары, графиттің жылу сыйымдылығы тұрақты болады.

Екінші кезеңде массаның шығыны (3.17) теңдеу шешімінен шыққан температура үлестірілуіне сәйкес есептелді.

$P_{eq}$  графитінің сублимацияланған газ қысымының тепе-теңдік мәні жұмысқа сәйкес берілген [105,106]:

$$P_{eq} = 6.77 \cdot 10^{12} \cdot 10^{(-36781/T)} \quad (3.18)$$

Беттен сублимациялайтын атомдар арқылы алып кету  $J_{ev}$  энергиясының ағыны:

$$J_{ev} = 1/4 \cdot n \cdot v \cdot m_a \cdot \Delta H_{бул} \quad (3.19)$$

мұнда  $n$  – көлем бірлігіндегі газ атомдарының саны,  $m_a$  – атом массасы,  $v$  – газ молекуласының орташа жылдамдығы. Идеалды газға жуықтау арақатынасы (3.19) түрді қабылдайды:

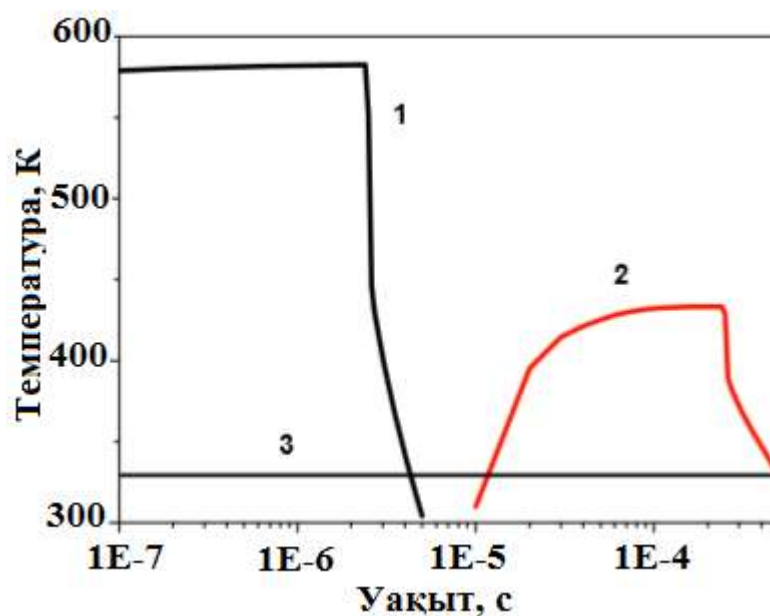
$$J_{ev} = P_{eq} \times [m_a/(2kT\pi)]^{1/2} \Delta H_{бул} \quad (3.20)$$

Сәйкесінше, алып кету массасының ағыны  $J_m$ :

$$J_m = J_{ev} / \Delta H_{бул} \quad (3.21)$$

Үлгі бетіндегі температураның үлестірілуін есептеу нәтижелерінің уақытқа тәуелділігі 3.33-суретте келтірілген.

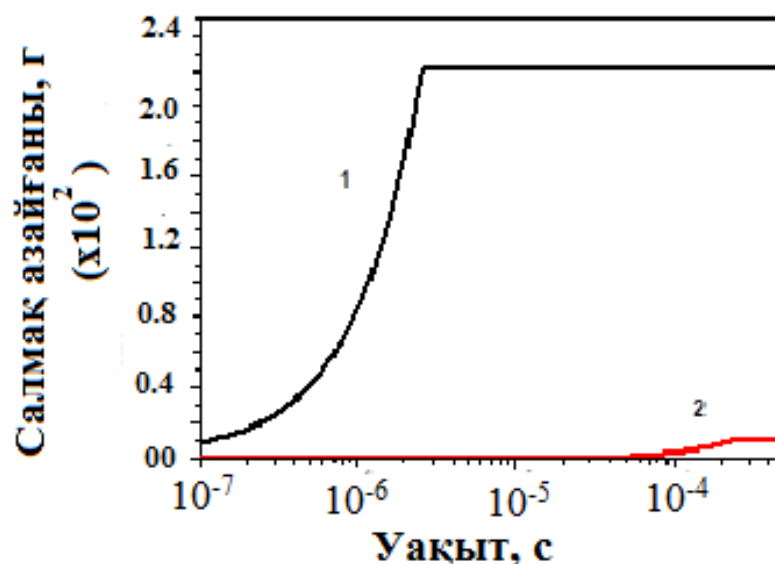
3.33-суреттен ұзақтығы 2.5 мкс импульсі кезінде және импульс үшін (1 қисық)  $10 \text{ Дж/см}^2$  энергия шығаруымен графит бетінің температурасы  $8 \text{ Дж/см}^2$  (2 қисық) энергия шығаруымен ұзақтығы 250 мкс импульстің әсері кезінде бет температурасынан 2 ретке жоғары екені көрініп тұр.



1 – импульстің ұзақтығы 2.5 мкс, энергия шығару  $10 \text{ Дж/см}^2$ ; 2-  
импульстің ұзақтығы 250 мкс, энергия шығару  $8 \text{ Дж/см}^2$ ;  
3-сублимация температурасы

Сурет 3.33 – Графиттің сәулеленетін бетіндегі температураның плазма ағынымен импульстік сәулелендіру кезіндегі уақытқа тәуелділігі

Екінші жағдайда импульстің ұзақтығы екі ретке жоғары болуына қарамастан, графит атомдарының сублимациясы және, сәйкесінше бірінші жағдайда массаның шығыны әлдеқайда жоғары, 3.34 суретті қара.



Сурет 3.34 - Графит массасы шығынының плазманың импульстік ағындарымен сәулелендіру уақытына тәуелділігі;  $10 \text{ Дж/см}^2$  энергия шығаруымен ұзақтығы 2.5 мкс 1 – 13 импульс;  $8 \text{ Дж/см}^2$  энергия шығаруымен ұзақтығы 250 мкс 2 – 4 импульс.

3.34-суретте 13 импульс үшін  $2.5 \text{ мкс}$  ұзақтығымен және  $10 \text{ Дж/см}^2$  (1 қисық) энергия ағынына және 4 импульс үшін  $250 \text{ мкс}$  ұзақтығымен және  $8 \text{ Дж/см}^2$  (қисық 2) энергия ағынына графит үлгісімен масса шығынының тәуелділігі келтірілген. 4 және 13 импульстер үшін графитпен массаның жиынтық шығыны экспериментті түрде анықталғандықтан (3.14-кестені қараңыз), онда 4-суреттерде экспериментке сәйкес келетін есептеу нәтижесі келтірілген.  $1 \text{ Дж/см}^2$  энергия шығаруымен  $2.5 \text{ с}$  он үш үшін массаның жиынтық шығынының есептік мәндері  $2.16 \text{ мкг}$  құрады, ұзақтығы  $250 \text{ мкс}$  және  $8 \text{ Дж/см}^2$  –  $0.11 \text{ мкг}$  энергия ағынының импульстері үшін, бұл ОНАУС аналитикалық таразы арқылы салмақты өлшеу дәлдігіне сәйкес келеді. Экспериментті түрде өлшенген мәндерімен (3.14-кесте) массаның шығынын есептеу нәтижелерін салыстырудан көрініп тұрғандай, теориялық бағалары бар эксперименттік деректердің қанағаттанарлық келісімі байқалады.

Жүргізілген эксперименттік зерттеулердің нәтижесінде плазманың үзілуі кезінде ТЯР энергия шығаруына сәйкес энергетикалық параметрлері бар импульстік плазмалық сәулелендіруде массаның шығыны графит бетінің жылу эрозиясына әкелетіні анықталған. Импульстің ұзақтығында бірнеше микросекунд және энергия шығаруында  $\sim 10 \text{ Дж/см}^2$ , импульс үшін массаның шығыны  $\sim 0.1\text{-}0.2 \text{ мкг}$  құрайды. Импульстің ұзақтығы кезінде екі ретке көп болса, яғни  $250\text{-}300 \text{ мкс}$ , бірақ аз энергия шығаруымен  $\sim 8 \text{ Дж/см}^2$ , массаның шығыны  $\sim 0.03 \text{ мкг}$  құрайды. Берілген модель бойынша алынған эксперименттік нәтижелерді есептеулермен салыстыру теориялық және эксперименттік деректердің қанағаттанарлық келісімі байқалатынын көрсетті. Есептік деректерді талдау көрсеткендей, массаның шығыны сәулелендіру параметрлерінің (энергия шығару және импульстің ұзақтығы) және сәулеленетін материалдың физикалық қасиеттеріне – жылу өткізгіштігіне, сублимация энергиясына, газдың тепе-теңдік қысымына байланысты. Жылу өткізгіштігі жоғары материалдар үшін сәулеленетін беттен жылуды қарқынды бұру беттің жергілікті балқуы мен булануына кедергі жасайды, бұл массаның шығынын төмендетеді.

## ҚОРЫТЫНДЫ

Жүргізілген зерттеулердің нәтижелері бойынша мынадай тұжырымдар жасауға болады:

Жұмыста аргонның, гелийдің және сутегінің төмен энергиялы иондарымен сәулелендіруден және энергияның импульсті ағынымен әсер етуден кейінгі аса таза DFW вольфрамды иондық тозандатуға, беттік қабаттарының құрылымын, механикалық қасиеттерін және жылулық эрозиясын өзгертуге зерттеу жүргізілді. Зерттеу әдістемесін жасау және DFW вольфрам үшін алынған нәтижелермен салыстыру үшін, осыған ұқсас зерттеулер аз көлемде графит пен молибден үшін жүргізілді.

Жұмыстың негізгі нәтижелері келесі нәтижелер болып табылады:

1. Тозанданған қабаттың қалыңдығын POP әдісімен өлшеуге негізделген, беттің тозандану коэффициентін эксперименттік анықтау әдістемесі жасалды. Әдістеменің мәні мынада: тозандану коэффициентін өлшеу қажет болатын материалдың қабаты атомдық салмағы аз болатын материалдан жасалған төсенішке жағылады. Кері шашыраған (сутегі, гелий, азот) иондарының спектрлері жақсы ажыратылады және жағылған қабаттың қалыңдығын жеткілікті жоғары дәлдікпен анықтауға болады. Молибден мен вольфрам үшін жасалған зерттеулер әзірленген әдістемені металл материалдардың тозандану коэффициенттерін эксперименттік өлшеу үшін қолдануға болатынын көрсетті. Осы әдістемені, мысалы, тозандану эффектілерінің иондық шоқтың түсу бұрышына, температураға және иондар флюенстеріне тәуелділігін зерттеу сияқты тозанданудың өте «әлсіз тұстарын» процестеріне зерттеу үшін ұсынуға болады.

2. Біз әзірлеген Резерфордтың кері шашырауының деректері бойынша тозанданған қабаттың қалыңдығын өлшеу әдістемесін қолданып вольфрам мен графитті энергиялары 100 кэВ аргон иондарымен тозандату коэффициенттерін эксперименттік өлшеу нәтижелері. Сонымен қатар тозандану коэффициентінің аргон иондарының флюенсіне тәуелділігі алынды. Вольфрамның тозандану коэффициентінің өлшенген  $5 \cdot 10^{17}$  ион $\times$ см $^{-2}$  флюенсте 1.6 ат/ион және  $1 \cdot 10^{18}$  ион $\times$ см $^{-2}$  флюенсте 1.9 болатын мәндері теориялық бағалаулармен сәйкес келеді. Вольфрамның тозандану коэффициентінің көптеген конструкциялық металдар мен қорытпаларға (болат, молибден, никель және т.б.) қарағанда айтарлықтай кіші болатыны көрсетілді, бұл оны ТЯР диверторының материалы ретінде қарастыруға мүмкіндік береді.

3. Вольфрам мен графиттің бетіне энергияның импульсті бөлінуінің әсерінің эффектілерін зерттеу. Вольфрамның импульсті электрондық сәулелендіруден кейінгі құрылымы мен қасиеттерін эксперименттік зерттеулер бетте эрозиямен және массаның азаюымен қатар жүретін жергілікті балқу аумақтарының байқалатынын көрсетті. Жылулық эрозия эффектімен қатар бұл материалдардың беттерінде температураның градиентінен болған микросызаттар түзілуі мүмкін. Температура градиентінен генерацияланатын термокернеулер вольфрамның беріктік шегін арттыруы және қабаттандыруы

және бұзылдыруы мүмкін. Тіпті бұзылу іздері болмағанның өзінде, термоядернеулер физикалық-механикалық қасиеттерінің деградациясына алып келуі мүмкін, ол беттің микроқаттылығының азаюынан және илемділігінің төмендеуінен көрінеді. Бетте энергияның импульсті бөлінуі кезіндегі масса шығынын бағалауға мүмкіндік беретін жылулық эрозия эффектісін зерттеуге арналған теориялық тәсіл жасалды.

4. Альфа-бөлшектермен сәулелендірілген вольфрамдағы газ қоспалардың жинақталуы мен беттің деградациясы (блистеринг, флекинг) зерттелді. Төмен энергиялы альфа-бөлшектермен сәулелендірілген вольфрамның бетінің құрылымының өзгеруі мен физикалық-механикалық қасиеттерінің деградация дәрежесі анықталды. Төменгі температураларда ( $\leq 150^\circ\text{C}$ ) жоғары флюенстерге ( $1.5 \cdot 10^{18}$  ион/см<sup>2</sup>) дейін сәулелендірудің блистерлердің түзілуіне және беттің қабыршақталуына әкелетіні белгілі болды. Термиялық әсер ету кезінде гелийдің төмен энергиялы иондарымен имплантацияланған вольфрамның құрылымы мен қасиеттерінің эволюцияларына зерттеулер жасалды.  $800^\circ\text{C}$  температурадағы жасыту кезінде вольфрамның гелий имплантацияланған қабатының қабаттала бастайтыны, ал  $1000^\circ\text{C}$  температура кезінде толығымен қабатталатыны, оның механикалық қасиеттерінің қалпына келуіне алып келетіні көрсетілді.

5. Растрлық электрондық микроскопия, термодесорбциялық спектроскопия және наноиндентирлеу сияқты әдістерді кешенді қолдану арқылы төмен энергиялы иондармен сәулелендірілген вольфрамдағы гелийдің жинақталуы зерттелді. Гелийдің блистерлермен қатар гелий-вакансиялық кластерлерде және тек гелий атомдарынан ғана тұратын кластерлерде жинақталатыны анықталды. Имплантацияланған гелий (~ 80%) гелий атомдарынан тұратын қозғалатын комплекстерде және қозғалмайтын гелий-вакансиялық комплекстерде альфа бөлшектердің жүретін аумағында да және одан тыс жерлерінде де жинақталады.

6. Энергияның импульсті бөлінуі мен төмен энергиялы альфа-бөлшектермен сәулелендіру кезіндегі беттің құрылымының деградациясына және физикалық-механикалық қасиеттеріне салыстырмалы талдау жүргізу беттің астындағы қабатқа гелийді имплантациялау вольфрамның қасиеттерінің импульсті электрондық сәулелендірумен салыстырғанда үлкен дәрежеде деградациялануына алып келетінін көрсетті. Төмен энергиялы альфа-бөлшектермен сәулелендіру кезіндегі гелий имплантацияланған қабаттың қабаттануы (қабыршақтануы) есебінен массаның шығындалуы импульсті электрондық сәулелендіру кезіндегі беттің жергілікті балкуындағы массаның шығындалуына жуық немесе одан көп болады.

7. Энергиясы 1 МэВ протондармен сәулелендірудің ерекше таза вольфрамның құрылымы мен қасиетіне әсерін экспериментте зерттеу  $5 \times 10^{16}$  см<sup>-2</sup> флюенске дейінгі сәулелендірудің беттің құрылымына аз әсер ететінін көрсетті.  $10^{17}$  см<sup>-2</sup> сәулелендіру флюенсі кезінде бетте хаосты таралған төбешіктер пайда болады, ал микроқаттылық 22%-ға артады. Протондармен және альфа-бөлшектермен сәулелендіру әсерлерін салыстырудан, альфа-

бөлшектермен сәулелендіру беттің құрылымы мен механикалық қасиеттерін көбірек өзгертетіні көрінеді. Осындай флюенске дейін альфа-бөлшектермен сәулелендіру кезінде бетте блистеринг және флекинг байқалады, ал беттің қаттылығы екі еседен көп өзгереді.

*Алға қойылған міндеттердің толықтай шешілуін бағалау*

Диссертациялық жұмыстың барлық алға қойылған міндеттері толық көлемде шешілді. Болжамды эксперименттік жұмыстар орындалды, алынған нәтижелерді талдау ғылыми кеңесшілермен және Ядролық физика институтының қолданбалы және теориялық материалтану зертханасының қызметкерлерімен бірге жасалды. Алынған нәтижелер мен қорытындылар конденсацияланған күй физикасы мен қатты дененің радиациялық физикасының ережелеріне қайшы келмейді.

*Диссертациялық жұмыстың нәтижелерін қолдану бойынша ұсыныстар*

Диссертациялық жұмыстың нәтижелерін термоядролық қондырғылардың плазмаға айналған элементтерін қорғауға арналған материалдарды таңдау кезінде қолдану ұсынылады. Резерфордтың кері шашырауын қолданып тозаңданған қабаттың қалыңдығын анықтау әдістемесі жұқа қабықшаларды алу, жабындардың құрамдарына талдау жасау және т.б. сияқты қолданбалы және ғылыми міндеттердің кең ауқымы үшін ұсынылуы мүмкін.

*Диссертациялық жұмыстың ғылыми деңгейін бағалау:*

Жасалған жұмыстың жеткілікті жоғары деңгейі нәтижелердің Ядролық физика институтының, әл-Фараби атындағы ҚазҰУ-дың мамандандырылған инженерлік бейін зертханасының және Вроцлав политехникалық университетінің сынақтан өткізген эксперименттік зерттеу әдістерін қолданумен қамтамасыз етіледі. Диссертацияның тақырыбы бойынша әдеби шолу термоядролық реакторларға арналған материалдарды таңдау мен жасау саласында зерттеулер жүргізетін ғалымдардың жұмыстарының спектрін қамтиды. Зерттеулердің нәтижелері Қазақстандық дәйексөз қорының және Thomson Reuter деректер қорына кіретін отандық және шетелдік журналдарда жарық көрді және халықаралық конференцияларда талқыланды.

Қорытындылай келе, диссертациялық жұмыстың барлық кезеңдерінде тұрақты назар аударып, өз ақылдары мен көмектерін аямаған ғылыми жетекшім ф.-м.ғ.к., Кислицин Сергей Борисовичке үлкен алғысымды білдіремін.

Теориялық есептеулер жүргізуде өзінің құнды кеңестер айтып, жұмыс барысын жиі қадағалап отырған шетелдік ғылыми жетекшім профессор Wojciech Wieleba –ке ерекше алғысымды білдіремін.

Диссертациялық жұмысымды зерделеу барында құрылғылармен көмек көрсеткен, Қолданбалы теориялық материалтану лабораториясының барлық қызметкерлеріне өзімнің алғысымды білдіремін.

Мен сондай-ақ, УКП-2-1 электростатикалық тандемді үдеткішінің және ДЦ-60 циклотрондарының және де әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті, металтану және жаңа материалдар технологиясы кафедрасының ұжымына өз алғысымды білдіремін.



## ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Behrisch R. First-wall erosion in fusion reactors // J. Nucl. Fusion. – 1972. – Vol. 12, №6. – P. 695 – 713.
2. Kaminsky M. Plasma contamination and wall erosion in thermonuclear reactors // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 1971. – Vol. 18, №4. – P. 208 – 221.
3. Behrisch R., Kadomtsev B.B. Plasma impurities and their significance in fusion reactor // In. Plasma physics and controlled nuclear fusion research. Vienna IAEA. – 1975. – Vol. 2, – P. 229 – 249.
4. Гусев В.М., Гусева М.И., Гервидс В.И., Коган В.И., Мартыненко Ю.В., Мирнов С.В. Вакуумно–физические условия на выбор материала первой стенки и диафрагмы демонстрационного термоядерного реактора Токамака (Т–20) // Препринт ИАЭ 2545. –М: ИАЭ, 1975. – 15с.
5. Калинин Б.А., Скоров Д.М., Якушин В.Л. Проблемы выбора материалов для термоядерных реакторов: Радиационная эрозия. – М: Энергоатомиздат, 1985. – 184 с.
6. Federici G., Skinner C.H., Brooks J.N. Plasma–material interactions in current tokamaks and their implications for next step fusion reactors // Nucl. Fusion. –2001. – Vol. 41, №41. – P. 1967 – 2137.
7. Krieger K., Maier H., Neu R., Rohde V., Tabasso A. Plasma–wall interaction at the ASDEX Upgrade tungsten heat shield // Fusion Engineering and Design. – 2001. – Vol. 56–57. – P.189 – 193.
8. Jeffrey P., Freidberg. Plasma Physics and Fusion Energy. – New–York: Cambridge University Press, 2007. – С.116 – 117.
9. Кудрявцев Ю., Азозова Р. Усовершенствованная "статистическая" модель образования вторичных ионов // Журнал технической физики. – 2009. – Т. 79, № 11. – С. 6 – 9.
10. Кудрявцев Ю., Гаярдо С. Зависимость вероятности ионизации распыленных атомов от их энергии // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2008. – №5. – С. 50 – 53.
11. Мартыненко Ю.В., Московкин П.Г., Колбасов Б.Н. Накопление и проникновение трития в первой стенке токамака ИТЭР в режиме со срывами // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. – 2001. – Вып. 3. – С. 65 – 72.
12. Фальконе Д., Теория распыления // УФН. – 1992. Т. 162, № 1. - С. 71 – 116.
13. Гервидс В.И., Коган В.И. Зависимость радиационных потерь термоядерной плазмы от атомного номера примеси и температуры // Письма в ЖЭТФ. – 1975. – Т. 21, Вып. 61. – С. 329 – 333.
14. Federici G., Coad J.P., Haasz A.A. et. al. Critical plasma–wall interaction issues for plasma–facing materials and components in near–term fusion devices // J. Nucl. Mater. – 2000. – Vol. 283–287. –P. 110 – 119.

15. Демура А. В., Леонтьев Д. С., Лисица В. С., Шурыгин В. А. Радиационные потери альфа-частиц на тяжелых ионах в термоядерной плазме // Письма в ЖЭТФ. 2017. – Т. 7, Вып. 106. – С. 429 – 433.
16. Tsytoovich V.N., Winter J. On the role of dust in fusion devices // Physics Uspekhi. –1998. – Vol. 41. – P. 815 – 822.
17. Winter J. Dust. A new challenge in nuclear fusion research? // Physics of Plasmas. – 2000. – Vol. 7. – 3862p.
18. Sigmund P. Theory of Sputtering // Physical Review. – 1969. – Vol.184. – P.383 – 416.
19. Распыление твердых тел ионной бомбардировкой Вып. 1. Физическое распыление одноэлементных твердых тел. / под ред. Р. Бериша. – М: Мир, 1984. С. 23 – 49
20. Распыление твердых тел ионной бомбардировкой Вып. 2. Физическое распыление одноэлементных твердых тел. / под ред. Р. Бериша. – М: Мир, 1986. 45с.
21. Bay H.L., Roth J., Bohdansky J. Light-ion sputtering yields for molybdenum and gold at low energies // Journal of Applied Physics. – 1977. – Vol. 48, №11. – P. 4722 – 4728.
22. Pearmain K., Unvala B.A.. Sputtering of silicon and gallium arsenide with medium energy intense ion beams of argon and xenon // Vacuum. –1975. – Vol.25, №1. – P. 3 – 7.
23. Pitts R.A., Carpentier S., Escourbiac F., Hirai T., Komarov V., Lisgo S. et al. A full tungsten divertor for ITER // physics issues and design status. – J. Nucl. Mater. – 2013. – Vol.438, – P. 48 – 56.
24. Philipps V. Tungsten as material for plasma-facing components in fusion devices // –Ibid – 2011. – Vol. 415. – P. 2 – 9.
25. Shimada M., Pitts R., Loarte A., Campbell D.J., Sugihara M., Mukhovatov V., Kukushkin A., Chuyanov V. ITER research plan of plasma-wall interaction // Ibid – 2009. – Vol. 390 – 391. – P. 282 – 285.
26. Ueda Y., Coenen J.W., De Temmerman G., Doerner R.P., Linke J., Philipps V., Tsitrone E. Research status and issues of tungsten plasma facing materials for ITER and beyond // Fusion Eng. Des. – 2014. – vol. 89. – P. 901 – 906.
27. Будаев В.П., Мартыненко Ю.В., Карпов А.В. и др. Рекристаллизация и растрескивание вольфрама при тепловых нагрузках, ожидаемых в ИТЭР // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. – 2013. – Т. 36, – Вып. 3. – 53с.
28. Linke J., Loewenhoff T., Massaut V., Pintsuk G., Ritz G., Rodig M., Schmidt A., Thomser C., Uytendhouwen I., Vasechko V., Wirtz M. Performance of different tungsten grades under transient thermal loads // Nucl. Fusion. – 2011. – Vol. 51. – 073017p.
29. Budaev V.P., Martynenko Yu.V., Karpov A.V. et al. Tungsten recrystallization and cracking under iter-relevant heat loads // J. Nucl. Mater. – 2015. – Vol. 463. – P. 237 – 240.

30. Davis J.W., Barabash V.R., Makhankov A., Ploch L., Slattery K.T. Assessment of Tungsten for Use in the ITER Plasma Facing Components // J. of Nucl. Mater. – 1998. – Vol.258–263 – P.308 – 312.
31. Loarte A. et al. Progress on the application of ELM control schemes to ITER scenarios from the non-active phase to DT operation // Nucl. Fusion. – 2014. – Vol. 54. – 033007p.
32. Loarte A. et al. Transient heat loads in current fusion experiments, extrapolation to ITER and consequences for its operation // Phys. Scr. – 2007. – Vol. 128. – P. 222 – 228.
33. Wirtz M., Linke J., Pintsuk G. et al. Comparison of the thermal shock performance of different tungsten grades and the influence of microstructure on the damage behavior // Phys. Scr. – 2011. – Vol. 145. – 014058p.
34. Wirtz M. et al. Comparison of thermal shock damages induced by different simulation methods on tungsten // J. Nucl. Mater. – 2013. – Vol. 438. – 833p.
35. Huber A. et al. Investigation of the impact on tungsten of transient heat loads induced by laser irradiation, electron beams and plasma guns // Fusion Sci. Technol. – 2013. – Vol. 63(1T). – P. 197 – 200.
36. Азизов Э.А., Айрапетов А.А., Беграмбеков Л.Б., Бужинский О.И., Вергазов С.В., Грунин А.В., Гордеев А.А. и др. Установка для нанесения покрытия карбида бора и тестирования материалов и покрытий при интенсивном плазменном облучении // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. – 2014. Т. 37, Вып. 4. – 30с.
37. Климов Н.С., Подковыров В.Л., Житлухин А.М. Разбрызгивание вольфрама при воздействии интенсивного потока плазмы // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. – 2009. – Вып. 2. – С. 52 – 62.
38. Zhitlukhin A. et al. Effect of ELMs on ITER divertor armour materials // J. Nucl. Mater. – 2007. – Vol. 363 – 365. – 301P.
39. Makhraj V.A., Garkusha I.E., Aksenov N.N., Bazylev B. et al. Plasma exposure of different tungsten grades with plasma accelerators under ITER-relevant conditions // Phys. Scr. – 2014. – 014040c.
40. Rieth M., Dudarev S.L., Gonzalez de Vicente S.M., Akta J. et al. Recent progress in research on tungsten materials for nuclear fusion applications in Europe // J. Nucl. Mater. – 2013. – Vol. 432. – P. 482 – 500.
41. Kuznetsov V., Gorbenko A., Davydov V. et al. Status of the IDTF high-heat-flux test facility // Nuclear Engineering and Design Fusion. – 2014. – vol. 89(7).
42. Hirai T. et al. Status of technology R&D for the ITER tungsten divertor monoblock // J. Nucl. Mater. – 2015. – Vol. 463. – P. 1248 – 1251.
43. Linke J. High heat flux performance of plasma facing materials and components under service conditions in future fusion reactors // Fusion Sci. Technol. – 2006. – Vol. 49. P. 455 – 464.
44. Loarte A. et al. Characteristics of type I ELM energy and particle losses in existing devices and their extrapolation to ITER // Plasma Phys. Controlled Fusion. – 2003. – Vol. 45. – P. 1549 – 1569.

45. Будаев В.П., Химченко Л.Н. О фрактальной структуре осажденных пленок в токамаке // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2007. – Т. 131, № 4. – С. 711 — 728.
46. Klimov N. et al. Experimental study of PFC erosion under ITER-like transient loads at plasma gun facility QSPA // J. Nucl. Mater. – 2009. – Vol. 390. – 721p.
47. Klimov N. et al. Experimental study of PFC erosion and eroded material deposition under ITER-like transient loads at plasma gun facility QSPA // J. Nucl. Mater. – 2011. – Vol. 415. – 59p.
48. Архипов Н.И., Сафронов В.М., Барсук В.А. и др. Эрозия углеграфитовых материалов при облучении интенсивными потоками плазмы // – ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. – 2009. – Вып. 4. – 3с.
49. Pintsuk G., Loewenhoff Th. Impact of microstructure on the plasma performance of industrial and high-end tungsten grades // J. Nucl. Mater. – 2013. – Vol. 438. – 945 p.
50. Будаев В.П. Результаты испытаний вольфрамовых мишеней дивертора при мощных плазменно-тепловых нагрузках, ожидаемых в ИТЭР И токамаках реакторного масштаба // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. – 2015. – Т. 38, Вып. 4. – С. 5 – 33.
51. Tokunaga K., Tamura S., Yoshida N. et al. Synergistic effects of high heat loading and helium irradiation of tungsten // Journal of Nuclear Materials. – 2004. – Vol. 329 – 333. – P.757 – 760.
52. Yuan Y., Greuner H., Böswirth B., et al. Recrystallization and grain growth behavior of rolled tungsten under VDE-like short pulse high heat flux loads // J. Nucl. Mater. – 2013. – Vol.433. – P. 523 – 530.
53. Yuan Y., Greuner H., Böswirth B., et al. Surface modification of molten W exposed to high heat flux helium neutral beams // J. Nucl. Mater. – 2013. – Vol. 437. – P. 297 – 302.
54. Гусева М.И., Мартыненко Ю.В. Радиационный блистеринг // Успехи физических наук. – 1981. – Т.135, Вып. 4. – С.671 – 689.
55. Неклюдов И.М., Толстолуцкая Г.Д. Гелий и водород в конструкционных материалах // ВАНТ Сер. физ. рад. повреждений и рад. материаловедение. – 2003. – № 3 (83). – С. 3 – 14.
56. Primak W. Radiation-Induced Cavities and Exfoliation // Journal of Applied Physics. – 1963. – Vol. 34. – P. 3630 – 3631.
57. Primak W., Luthra J. Radiation Blistering: Interferometric and Microscopic Observations of Oxides, Silicon, and Metals // Journal of Applied Physics. – 1966. – Vol.37. –P. 2287 – 2294.
58. Гусева М.И., Евмененко М.Е., Иванов С.М., Мартыненко Ю.В. Топография поверхности при блистеринге радиационного и нерадиационного происхождения // Атомная энергия. – 1981. – Т. 50, №6. – С. 212 – 215.
59. Das S.K., Kaminsky M. Reduction of surface erosion caused by helium blistering in sintered beryllium and sintered aluminum powder. // J. Nucl. Mater. – 1976. – Vol. 63. – P. 292 – 298.

60. Bauer W., Thomas G.J. Helium implantation effects in SAP and aluminum. // J. Nucl. Mater. – 1976. – Vol. 63. – P. 299 – 306.
61. Зеленский В.Ф., Неклюдов И.М., Черняева Т.П. Радиационные дефекты и набухание металлов. // Киев: Наукова думка, 1988. – 296 с.
62. Kasada R., Morimura T., Hasegawa A., Kimura A. Effect of helium implantation on mechanical properties and microstructure evolution of reduced-activation 9Cr–2W martensitic steel // J. of Nucl. Mater. – 2001. – Vol. 299. – P. 83 – 89.
63. Kawano S., Fukuya K., Kano F. et.al. Effect of weld cycle and restraint stress on helium bubble formation in stainless steels // J. of Nucl. Mater. – 2000. – Vol. 283 – 287. P. 1220 – 1223.
64. Fabritsiev S.A., Pokrovsky A.S. Radiation resistance of weld joints of type 316 stainless steel containing about 10 appm He // J. of Nucl. Mater. – 2000. – Vol. 283 – 287. P. 1215 – 1219.
65. Bolt H., Barabash V., Krauss W., Linke J., Neu R., Suzuki S, et al. (2004). Materials for the plasma-facing components of fusion reactors // J. Nucl. Mater. – 2004. – Vol. 329 – 333. – P. 66 – 73.
66. Жаканбаев Е.А., Володин В.Н., Тулеушев Ю.Ж. Структура и свойства покрытий из нитрида ниобия при ионноплазменном формировании. // Вестник НЯЦ. – 2007. – №1. – С. 18 – 22.
67. Патент РФ №2214477. Установка для нанесения покрытий / Тулеушев А. Ж. и др; опубл. 20.10.2003. Бюл № 29.- С. 1 – 6.
68. Ono K., Arakawa K., Shibasaki H., et al. Release of helium from irradiation damage in Fe–9Cr ferritic alloy // J.Nucl. Mater. – 2004. – Vol. 329 – 333. – P. 933 – 937.
69. Чжи Зин У, Чернов И.И., Стальцов М.С., Калинин Б.А., Калашников А.Н., Бинюкова С.Ю., Аунг Чжо Зо. Термодесорбция гелия из реакторных сталей. // Атомная энергия. – 2001. – Т.10, Вып.1. – С. 130 – 137.
70. Николаева И.П., Стальцов М.С., Чернов И.И., Калинин Б.А., Богачев И.А., Гусева Л.Ю., Дрожжина М.В., Беляев А.А., Тищенко А.Г. Влияние концентрации оксида иттрия на формирование гелиевой пористости в феррито-мартенситной дисперсионно-упрочненной оксидами стали // Атомная энергия. – 2018. – Т.124, Вып.3. – С. 144 – 149.
71. Arzumanov A.A., Borisenko A.N., Gorlachev I.D., Eliseev A.S., Kadyrzhanov K.K., Lysukhin S.N., Platov A.V., Sapozhnikov A. Tandem accelerator UKP–2–1 in nuclear–physical investigations. – Almaty: Institute of nuclear physics, – 2002. – 35p.
72. Uglov V.V, Rusalski D.P., Zlotski S.V., Sevriuk A.V., Abadias G., Kislitsin S.B., Kadyrzhanov K.K., Gorlachev I.D., Dub S.N. Stability of Ti–Zr–N coatings under Xe–ion irradiation // Surface & Coatings Technologies. – 2010. – Vol. 204. – P. 2095 – 2098.
73. Utegenov A.U., Tazhen A.B., Dosbolayev M.K., Ramazanov T.S. Experimental investigation of the interaction of plasma flow with the wall of fusion

reactor // 21st International symposium on Heavy Ion Inertial Fusion. Book of abstracts. – 2016. – 53p.

74. Досболаев М.К., Утегенов А.У., Тажен А.Б., Рамазанов Т.С., Габдуллин М.Т. Динамические свойства импульсного плазменного потока и пылеобразование в ИПУ // Известия НАН РК. Сер. Физико–математическая. – 2016. – Т. 6, № 310. – С. 59 – 66.

75. Кислицин С.Б., Иванов И.Д., Диков А.С., Ганеев Г.З. Блистеринг и накопление гелия в нержавеющей стали 12X18H10T, чистых металлах вольфраме и молибдене, индуцированные облучением низкоэнергетическими альфа–частицами // Известия ВУЗов Физика. – 2018. – Т.61, №8/2. – С. 68 – 72.

76. Баязитова Ж.Т., Горлачев И.Д., Карпиков А.Н., Кислицин С.Б., Лысухин С.Н. Экспериментальное определение коэффициента распыления молибдена при облучении низкоэнергетическими ионами аргона // Вестник НЯЦ. – 2011. – № 3(47). – С.72 – 77.

77. Алдабергенова Т.М., Козырева М.С., Карпиков А.Н., Кислицин С.Б., Уралов М.К. Экспериментальное определение коэффициента распыления поверхности мо, w и графита ионами аргона // Вестник НЯЦ РК. серия физ.–мат. – 2017. – № 3. – С.17 – 23

78. Thomas E.W., Janev R.K., Botero J. [et al] An Evaluated Data Base for Sputtering //Vienna: IAEA. – 1993. – P. 48.

79. Almen O., Bruce G. Collection and sputtering experiments with noble gas ions. // J. Nucl. Instrum. Methods. – 1961. – Vol. 11. – P. 257 – 278.

80. Горлачев И.Д., Карпиков А.Н., Кислицин С.Б., Лысухин С.Н. Распыление поверхности молибдена низкоэнергетическими ионами аргона // Труды VIII Международ. конф. «Перспективные технологии, оборудование, аналитические системы для материаловедения и наноматериалов». – Алматы: КазНУ им. аль–Фараби, 2011. – С.291 – 298.

81. Switkowski Z.E., Mann F. M., Kneff D. W., Ollerhead R. W., Tombrello T. A. A new technique for the measurement of sputtering yields // Rad. Effects. – 1976. – Vol.29. P. 65 – 70.

82. Распыление твердых тел ионной бомбардировкой Вып. 1. Физическое распыление одноэлементных твердых тел. / под ред. Р. Бериша. – М: Мир, 1984.

83. Ганеев Г.З., Алдабергенова Т.М., Кислицин С.Б. Эрозия поверхности и изменение физико–механических свойств молибдена и вольфрама под действием импульсного электронного облучения // Материалы XIV Международной научной конференции «Физика твердого тела, функциональные материалы и новые технологии». – Караганда:КарГУ, 2018. – С. 25 – 28.

84. Алдабергенова Т.М., Ганеев Г.З., Кислицин С.Б. Тепловая эрозия вольфрама при импульсном электронном облучении // Тезисы 11–й Международной конференции «Ядерная и радиационная физика». ИЯФ МЭ РК. – Алматы:ИЯФ, 2017. – 201с.

85. Физические величины. Справочник / под ред. Григорьева И.С, Мелихова Е.З. – М.:Энергоиздат. – 1991. – 1232 с.

86. Dorogokupets P.I., Oganov A.R. Ruby, metals, and MgO as alternative pressure scales: A semiempirical description of shockwave, ultrasonic, x-ray, and thermochemical data at high temperatures and pressures. // *Phys. Rev.* – 2007. – Vol.B75. – P.1 – 16.

87. Johnson K.W.R., Kerrisk J. F. Thermal diffusivity of molybdenum and tungsten between 20°C and 2000°C. // *Proceedings of 11-th International Conference on Thermal Conductivity*, 1971. – P.3 – 4.

88. Алдабергенова Т.М., Ганеев Г.З., Кислицин С.Б., Wojciech Wieleba. Влияние бомбардировки ионами из плазмы остаточного газа на структуру и свойства поверхности высокочистого вольфрама // «ФАРАБИ ЭЛЕМИ» атты студенттер мен жас ғалымдардың Халықаралық ғылыми конференциясы. – Алматы, 2018. – 185с.

89. Алдабергенова Т.М., Виелеба В., Кислицин С.Б. Қалдық газ плазмасы иондарымен сәулелендірілген жоғары таза вольфрам бетінің құрылымы мен қасиеттері // *Физика–математика сериясы. КазҰТЗУ Хабаршысы.* – 2018. – №4. – Б. 117 – 112.

90. Tereshko I.V., Abidzina V.V., Elkin I.E., etc. The formation of nanoclusters in metals by the low-energy ion irradiation in glow discharge plasma. // *Изв. вузов. Физика.* – 2006. – №8. – С.198–201.

91. Козлов Э.В., Терешко И.В., Ходырев В.И. и др. Формирование дефектной структуры при воздействии на металлы плазмы газового разряда // *Изв. вуз. Сер. Физика.* – 1992. – № 1. – С. 14 – 19.

92. Aldabergenova T. M., Kislitsin S.B., Larionov A.C., Yar-Mukhamedova G.S. Effect of low-energy alpha particles irradiation on surface structure and physical-mechanical properties of high-purity tungsten // *Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций: тез. межд. конфю.* – Томск:ТПУ, 2016.– 209с.

93. Aldabergenova T.M., Kislitsin S.B., Larionov A.C., Yar-Mukhamedova G.S. Effect of Low-Energy Alpha Particles Irradiation on Surface Structure and Physical-Mechanical Properties of High-Purity Tungsten. // *American Institute of Physics: Conference Proceedings.* – 2016. – Vol.1783. – P. 020003/1 – 2003/4.

94. Алдабергенова Т.М., Кислицин С.Б., Ганеев Г.З., Виелеба В. Накопления гелия в вольфраме, облученном высокоэнергетическими альфа-частицами // *Материалы XIV Между-народной научной конференции «Физика твердого тела, функциональные материалы и новые технологии» (ФТТ-2018), посвященная 80-летию основателя конференции профессора Кукетаева Т.А.* – Бишкек–Караганда, 2018, – С. 93 – 96.

95. Алдабергенова Т.М., Виелеба В., Ганеев Г.З., Кислицин С.Б. Влияние термических отжигов на структуру и свойства поверхности вольфрама, облученного низкоэнергетическими альфа-частицами до высоких флюенсов // *Известия ВУЗов. Физика.* – 2018. – Т. 61, №8. – С.117 – 123.

96. Кислицин С.Б., Верещак М.Ф., Манакоева И.А., Озерной А.Н., Сатпаев Д.А., Тулеушев Ю.Ж. Блистеринг и гамма-альфа превращения при отжиге стали 12X18H10T, облученной низкоэнергетическими альфа-частицами // *Вопросы*

атомной науки и техники. Сер. физика радиац. поврежд. и радиац. материаловед. – 2013. – №2(84). – С. 17 – 22.

97. Faney Th. Numerical Simulations of Tungsten under Helium Irradiation. PhD Dissertation. – 2013. – 116 p.

98. Duc Nguyen–Manh<sup>1</sup>., Dudarev S.L., Trapping of He Clusters by Inert–Gas Impurities in Tungsten: First–Principles Predictions and Experimental Validation CCFE // Culham Science Centre, Abingdon, Oxon, OX14 3DB, United Kingdom. – 2014. – 8p.

99. Li X.–Ch., Shu X., Liu Y.–N., Yu Y., Gao F. Lu G.–H. Analytical W–He and H–He interatomic potentials for a W–H–He system // J. Nucl. Mater. – 2012. – Vol. 426. – P. 31 – 37.

100. Aldabergenova T.M., Wieleba W., Kislitsin S. Influence of the proton irradiation on surface structure and physical mechanical properties tungsten // Abstract of International Conference Ion Implantation and other Applications of Ions and Electrons. – Poland, Kazimiers Dolny, 2018, – 73p.

101. Hassane A.M., Kulcinski G.L. and Wolfer W.G. Vaporization and melting of materials in fusion devices // J.Nucl. Mater. – 1981. – V. 103&104. – P.321 – 326.

102. Aldabergenova T., Ganeev G., Kislitsin S., Yar Mukhamedova G. Impact of pulsed plasma beam on the thermal erosion and the surface structure of graphite // Тезисы докл. Abstract 21st International «Symposium on Heavy ion fusion». – Astana, Kazakhstan 2016. – 56p.

103. Алдабергенова Т.М., Ганеев Г.З., Кислицин С.Б., Досболаев. М.К. Влияние импульсного плазменного облучения на термическую эрозию и структуру поверхности графита // Известия НАН РК. серия физ.–мат. – 2017. – № 3. – С. 57 – 63.

104. Алдабергенова Т.М., Кислицин С.Б. Тозандату коэффициенті және 100 кэВ энергиялы аргон иондарымен сәулелендірілген графит бетінің құрылымы // Физика– математика сериясы КазҰТЗУ Хабаршысы. – 2018. – №2. – Б. 533 – 540.

105. Физические величины. Справочник / под ред. Григорьева И.С, Мелихова Е.З. – М.:Энергоиздат. – 1991. – 1232 с.

106. Properties and characteristics of graphite. For industrial applications. Special materials. POCO GRAPHITE INC. January 2015. [http: // poco.com/Portals/0/Literature/Semiconductor/IND – 109441 – 0115.pdf](http://poco.com/Portals/0/Literature/Semiconductor/IND-109441-0115.pdf)