

«Дәулет Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті»  
коммерциялық емес акционерлік қоғамы

ӘОЖ 538.9.539.8

Қолжазба құқығында

**ҚАНТАЙ НҰРҒАМИТ**

**Алюминий оксиді негізіндегі детонациялық жабындарды алу және  
олардың физикалық-механикалық қасиеттерін зерттеу**

6D072300 – Техникалық физика

Философия докторы (PhD)  
дәрежесін алу үшін дайындалған диссертация

Ғылыми кеңесші:  
PhD докторы,  
қауымдастырылған профессор,  
Рахадиллов Б. К.

Paszkowski M., DSc,  
қауымдастырылған профессор,  
Польша

Қазақстан Республикасы  
Өскемен, 2022

## МАЗМҰНЫ

|  |    |
|--|----|
| <b>БЕЛГІЛЕР МЕН ҚЫСҚАРТУЛАР</b> .....  | 4  |
| <b>КІРІСПЕ</b> .....   | 5  |
| <b>1 ГАЗОТЕРМИЯЛЫҚ ТОЗАҢДАНУ ӘДІСТЕРІМЕН <math>Al_2O_3</math> НЕГІЗІНДЕГІ ЖАБЫНЫ АЛУ МӘСЕЛЕСІНІҢ ҚАЗІРГІ ЖАЙ-КҮЙІ (ӘДЕБИЕТТЕРГЕ АНАЛИТИКАЛЫҚ ШОЛУ)</b> ..... | 10 |
| 1.1 Алюминий оксиді негізіндегі жабындар және оның қолданылуы.....   | 10 |
| 1.2 Алюминий оксиді негізіндегі жабынды алуда қолданылатын әдістерді талдау .....  | 16 |
| 1.2.1 $Al_2O_3$ негізіндегі жабындарды ауа плазмалық тозаңдату (APS) арқылы алу .....  | 20 |
| 1.2.2 $Al_2O_3$ негізіндегі жабындарды жоғары жылдамдықты газ жалынды тозаңдату (HVOF) арқылы алу .....  | 24 |
| 1.2.3 $Al_2O_3$ негізіндегі жабындарды алуда детонациялық тозаңдату (DS) әдісін қолдану .....  | 25 |
| 1.3 $Al_2O_3$ негізіндегі жабындардың құрылымдық қасиеттерінің ерекшеліктері және оларды жақсарту жолдары .....  | 29 |
| Қорытынды және міндеттерді қою.....  | 39 |
| <b>2 ЭКСПЕРИМЕНТТЕР ЖҮРГІЗУ МАТЕРИАЛДАРЫ, ЖАБДЫҚТАРЫ МЕН ӘДІСТЕМЕЛЕРІ</b> .....  | 41 |
| 2.1 Зерттеу материалы .....  | 41 |
| 2.2 Жабын алудың детонациялық тозаңдау кешені және оның құрылымы.....  | 41 |
| 2.3 Зерттеудің эксперименттік әдістері .....   | 43 |
| 2.3.1 Металлографиялық талдау .....  | 43 |
| 2.3.2 Жабындардың беттік морфологиясын зерттеу әдістері .....  | 44 |
| 2.3.3 Жабындарды элементтік талдау (EDS) .....   | 44 |
| 2.3.4 Рентгендік дифракциялық талдау (XRD) .....   | 46 |
| 2.4 Алюминий оксиді негізіндегі жабынның механикалық және трибологиялық қасиеттерін зерттеу әдістері .....   | 49 |
| 2.4.1 Микроқаттылықты анықтау .....  | 49 |
| 2.4.2 Наноқаттылықты өлшеу әдісі (НаноСкан – 4D компакт) .....   | 50 |
| 2.4.3 Тозуға төзімділікті сынау әдістемесі (TRB <sup>3</sup> трибометрі) .....   | 51 |
| 2.4.4 Скрэтч-тестер әдісі.....   | 54 |
| Екінші бөлім бойынша қорытынды .....   | 55 |
| <b>3 <math>Al_2O_3</math> ОКСИДІ НЕГІЗІНДЕГІ ДЕТОНАЦИЯЛЫҚ ЖАБЫНДЫНЫҢ ЖЫЛУЛЫҚ ӨНДЕУ КЕЗІНДЕГІ ҚҰРЛЫМДЫҚ-ФАЗАЛЫҚ ТҮРЛЕНУЛЕРІНІҢ ЗАҢДЫЛЫҚТАРЫ</b> .....         | 56 |
| 3.1 Детонациялық тозаңдату әдісімен жағылған $Al_2O_3$ негізіндегі жабындының қалыңдығының оның құрылымы мен қасиетіне әсері .....                           | 56 |
| 3.2 $Al_2O_3$ оксидінен жасалған детонациялық жабындардың құрлым-фазалық және механикалық қасиеттеріне жылулық өндеудің әсерін зерттеу.....                  | 69 |
| 3.3 $Al_2O_3$ негізіндегі жабынның механикотрибологиялық қасиеті мен   |    |

|   |            |
|---|------------|
| фазаалық құрамына детонациялық және ауа плазмалық өңдеудің әсері .....  | 79         |
| Үшінші бөлім бойынша қорытынды .....  | 84         |
| <b>4 ДЕТОНАЦИЯЛЫҚ ТОЗАҢДАНУ РЕЖИМІНІҢ ФАЗАЛЫҚ ҚҰРАМҒА ЖӘНЕ <math>Al_2O_3</math> ЖАБЫНДЫЛАРЫНЫҢ ТРИБОЛОГИЯЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІНЕ ӘСЕРІ .....</b>                                     | <b>87</b>  |
| 4.1 Ату жылігінің $Al_2O_3$ детонациялық жабынының фазалық құрамы мен трибомеханикалық қасиеттеріне әсері .....   | 87         |
| 4.2 Детонациялық оқпанды газға толтыру мөлшерінің $Al_2O_3$ жабындарының фазалық құрамына және трибологиялық қасиеттеріне әсері .....   | 94         |
| 4.3 $Al_2O_3$ негізіндегі алынған градиентті жабынның адгезиялық беріктігін және физикомеханикалық қасиетін зерттеу .....   | 104        |
| 4.4 $Al_2O_3$ ұнтағына NiCr ұнтағын араластыру арқылы алынған градиентті жабынның құрылым-фазалық, физикомеханикалық және трибологиялық сипаттамаларын салыстыра зерттеу..... | 118        |
| Төртінші бөлім бойынша қорытынды .....  | 123        |
| <b>ҚОРЫТЫНДЫ.....</b>   | <b>126</b> |
| <b>ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ.....</b>   | <b>129</b> |
| <b>ҚОСЫМША А</b> Диплом.....  | <b>152</b> |
| <b>ҚОСЫМША Б</b> Пайдалы моделге патент.....  | <b>153</b> |
| <b>ҚОСЫМША В</b> Пайдалы моделге патент.....  | <b>154</b> |
| <b>ҚОСЫМША Г</b> Өндіріске ендіру актісі.....   | <b>155</b> |
| <b>ҚОСЫМША Ғ</b> Оқу процесіне енгізу актісі .....  | <b>156</b> |
| <b>ҚОСЫМША Д</b> Анықтама.....  | <b>157</b> |

## БЕЛГІЛЕР МЕН ҚЫСҚАРТУЛАР

|                        |  |
|------------------------|--|
| ГТТӘ                   | – газотермиялық тозаңдану әдісі  |
| ДТ (DS)                | – детонациялық тозаңдау (Detonation spraying)  |
| HVOF/HVAF              | – жоғары жылдамдықты газ жалынды тозаңдау  |
| CVD                    | – химиялық тұндыру (Chemical Vapor deposition)   |
| APS                    | – ауа-плазмалық тозаңдату (Air-plasma spraying)  |
| АЭ                     | – акустикалық эмиссия  |
| ҚЦК                    | – қабырғасы центрленген кубтық тор   |
| КША (ОКР)              | – когрентті шашырау аймағы   |
| КЦК                    | – көлемі центрленген кубтық тор  |
| ГТҚ                    | – гексагоналды тығыз қапталған кубтық тор  |
| ЖЭМ (ПЭМ)              | – жарық өткізгіш электронды микроскопия  |
| РҚТ (РСА)              | – рентген-құрлымдық талдау   |
| РФТ (РФА)              | – рентгенофлуоресценттік талдау  |
| РЭМ                    | – растрлы электронды микроскопия   |
| СТМ                    | – сканерлеуші туннельді микроскоп  |
| ЭДС (EDS)              | – энергия дисперсиялық спектрометр (микроталдау)   |
| Arc-PVD                | – вакуумды доғалық тұндыру (Arc Physical Vapor Depositon)  |
| HRC                    | – Роквелл бойынша қаттылық   |
| PVD                    | – газ фазасынан физикалық тұндыру (Physical Vapour Deposition)   |
| <i>E</i>               | – қатты дененің серпімділік модулі (Юнг Модулі)  |
| <i>H</i>               | – заттың қаттылығы   |
| <i>H<sub>max</sub></i> | – максималды қаттылық  |
| <i>d</i>               | – түйіршік диаметрі (кристалдың)   |
| <i>L<sub>C1</sub></i>  | – сызаттардың төменгі бөлігіндегі алғашқы шеврондық жарықтардың пайда болу сәтіне жауапты сыни жүктеме |
| <i>L<sub>C2</sub></i>  | – сызаттардың төменгі бөлігінде бірнеше шеврондық жарықтардың пайда болу уақыты                        |
| <i>L<sub>C3</sub></i>  | – жабынның когезионды-адгезионды бұзылуын сипаттайтын параметр   |
| <i>L<sub>C4</sub></i>  | – жабын аймақтарының жергілікті қабыршақтануы  |
| <i>L<sub>C5</sub></i>  | – төсеніштегі жабынның пластикалық желінуі, адгезия беріктігін жоғалту                                 |
| <i>U<sub>C</sub></i>   | – төсеніштегі ығысу потенциалы   |
| <i>R<sub>a</sub></i>   | – бетінің кедір-бұдырлығы  |
| <i>μ</i>               | – үйкеліс коэффициенті   |

## КІРІСПЕ

**Жұмыстың жалпы сипаттамасы.** Диссертациялық жұмыс олардың трибологиялық және механикалық сипаттамаларын арттыру мақсатында алюминий оксиді негізіндегі жабындыларды детонациялық тозаңдату процесін оңтайландыруға, сондай-ақ детонациялық тозаңдатудың технологиялық параметрлерінің алюминий оксиді жабындыларының құрылымдық-фазалық күйін және физика-механикалық қасиеттерін қалыптастыруға әсерін эксперименттік зерттеуге арналған. Жұмыста алюминий оксиді жабындарының құрылымы, фазалық құрамы, микроқаттылығы, наноқаттылығы, коррозияға төзімділігі, тозуға төзімділігі, тозуға төзімділігі, эрозияға төзімділігі және ыстыққа төзімділігіне тозаңданудың технологиялық параметрлерінің (ату жиілігі, оқпан толтыру көлемі) және термиялық күйдіруден кейігі әсері зерттелді. Алюминий оксидінің градиент жабынын қолдану әдісі әзірленді, ол жоғары қаттылыққа, тозуға және жабысқақ беріктікке ие.

**Зерттеу тақырыбының өзектілігі.** Қазіргі заманғы машина жасауда материалдардың бетіне айрықша көңіл бөлінеді, олардың күйі машина бөлшектері мен аспаптарының өнімділік қасиеттеріне әсер етеді. Машина бөлшектерін, құрал-саймандарды және технологиялық жабдықтарды пайдалану кезінде беткі қабаттар ең қарқынды әсерге ұшырайды. Қазіргі уақытта бұйымдарды қатайту және металдар мен қорытпалардың бетінің физикалық-механикалық қасиеттерін жақсарту үшін жоғары физикалық-механикалық сипаттамалары бар қорғаныс жабындары қолданылады: қаттылық, тозуға және агрессивті орталарға төзімділік, төмен жылу және электр өткізгіштік және т.б., бұл құрылымдық бөліктердің қызмет ету мерзімін және сенімділігін айтарлықтай арттыруға мүмкіндік береді. Жоғарыда аталған талаптардың кең ауқымына сәйкес келетін қорғаныс жабындарын жасау үшін алюминий оксиді керамикасы кеңінен қолданылады. Алюминий оксиді негізіндегі жабындар жоғары химиялық және термиялық тұрақтылыққа ие, сондықтан олар үлкен практикалық қызығушылық тудырады, әдетте жоғары температуралы агрессивті ортада олардың сипаттамаларын жақсарту үшін металдарға қолданылады.

Алюминий оксидіне негізделген жабындарды алу үшін анодтау, термиялық тотығу (ТТ), газ-термиялық тозаңдау (ГТТ), микродоғалы тотығу (МДТ) және т. б. әдістері кеңінен қолданылады. Олардың ішінде ең перспективалысы жеке бөліктерді және тұтас құрылымдарды тозудан, коррозиядан, қызып кетуден, агрессивті ортаның әсерінен және т.б. қорғау мәселелерін шешуге мүмкіндік беретін термиялық тозаңдау әдісі болып табылады. Газ-термиялық тозаңдау әдістеріне жататын плазмалық, жалындық және детонациялық тозаңдау технологиясын қолдана отырып, алюминий оксиді негізіндегі жабындарды алуға арналған көптеген жұмыстар бар. Плазма, жалын және детонациялық тозаңдау арқылы алюминий оксидінен жабын алу үшін әдетте бастапқы ұнтақ ретінде  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  қолданылады. Бұл жағдайда алынған жабын іс жүзінде корундты газ жалынымен тозаңдағанда негізінен  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ -ден тұрады, ал плазмалық және детонациялық тозаңдаудан кейін  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  және  $\gamma$ -

$Al_2O_3$ -тен тұратын екі фазалы жабынды құрайды. Бірақ алынған жабындардың негізгі фазасы  $\gamma-Al_2O_3$  болғандықтан, ол салыстырмалы түрде бос құрылымды және жинақылығы, қаттылығы, абразивті және коррозияға төзімділігі  $\alpha-Al_2O_3$  карағанда әлдеқайда төмен. Алюминий тотығы жабындарының физикалық-механикалық қасиеттерін жабын құрамындағы  $\alpha-Al_2O_3$  үлесін арттыру арқылы жақсартуға болады. Әдетте бұл үшін көлемді немесе беткі жылулық өңдеулер қолданылады. Алайда, бұл жабындарды алу процесінің күрделілігін арттырады және экономикалық тұрғыдан тиімсіз. Сондықтан алюминий оксиді негізіндегі газ-термиялық жабындардың физика-механикалық сипаттамаларын жақсартудың негізгі міндеттерінің бірі  $\alpha-Al_2O_3$  фазаларының көлемдік үлесін қосымша термиялық өңдеусіз арттыру болып табылады. Бұл мәселені алюминий оксидінің жабындыларын тозаңдау процесін оңтайландыру арқылы шешуге болады және бұл детонациялық тозаңдау арқылы жүзеге асуы мүмкін, бұл газ жарылысын шашыратылған ұнтақ материалының бөлшектерін жеделдету және жылыту үшін қолдану арқылы анықталады. Детонациялық тозаңдау кезінде ұнтақ материал ериді және соққы толқынының әсерінен жоғары жылдамдықпен қозғалып, төсеніштің бетінде жабын пайда болады. Жоғары жылдамдық жабынның құрылымы мен физикалық-механикалық сипаттамаларын қалыптастырудың маңызды факторы болып табылады.

Қазіргі уақытта керамикалық және металл-керамикалық жабындардың, соның ішінде алюминий оксиді жабындарының қасиеттерін болжауға толық мүмкіндік беретін детонациялық тозаңдаудің технологиялық параметрлерін есептеудің нақты әдістері жоқ. Сондықтан оптималды режимді таңдау арқылы детонациялық жабындардың қасиеттерін анықтайтын технологиялық параметрлердің әсерін тәжірибе жүзінде анықтадық.

Жоғарыда айтылғандарға байланысты диссертациялық жұмыстың тақырыбы Жоғары трибологиялық және механикалық сипаттамалары бар алюминий оксидінің жабындарын алу үшін детонациялық тозаңдау әдісін жетілдіруге арналған, сондай-ақ, детонациялық тозаңданудың технологиялық параметрлерінің алюминий оксидінің жабындарының құрылымдық-фазалық күйін және физикалық-механикалық қасиеттерін қалыптастыруға әсерін тәжірибелік зерттеу өзекті болып табылады.

**Диссертациялық жұмыстың мақсаты** алюминий оксиді жабынының құрылымдық-фазалық күйі мен физика-механикалық қасиеттерінің қалыптасуына детонациялық тозаңдаудың технологиялық параметрлерінің әсерін зерттеу болып табылады.

Осы мақсатқа жету үшін келесі **міндеттер** шешілді:

- детонациялық тозаңдау әдісімен алынған алюминий оксиді жабындарының құрылымы мен қасиеттеріне жылулық өңдеудің әсерін зерттеу;
- детонациялық тозаңдау кезінде ату жиілігінің алюминий оксиді жабындарының құрылымы мен қасиеттеріне әсерін зерттеу;
- алюминий оксиді жабындарының құрылымдық-фазалық күйінің, механикалық және трибологиялық қасиеттерінің қалыптасуына детонациялық оқпанды жарылғыш қоспамен толтыру дәрежесінің әсерін зерттеу;

– жоғары механикалық және трибологиялық сипаттамаларға ие градиентті жабындарды алудың детонациялық тозаңдату тәсілін әзірлеу.

**Зерттеу нысаны** детонациялық тозаңдату әдісімен алынған алюминий оксиді жабындары.

**Зерттеу пәні** – детонациялық тозаңданудың технологиялық параметрі; алюминий оксиді жабындарының жылулық өндеуден кейінгі құрылымы мен қасиеттерін қалыптастыру ерекшелігі.

**Зерттеу әдістері.** Қойылған міндеттерге сәйкес келесі талдау әдістері қолданылды: сканерлеуші электрондық микроскопия (SEM); энергетикалық дисперсиялық рентгендік микроталдау (EDS); рентгендік дифракциялық талдау (XRD); наноқаттылықты, микроқаттылықты өлшеу, тозуға төзімділікке, ыстыққа төзімділікке және коррозияға төзімділікке сынау.

#### **Жұмыстың ғылыми жаңалығы:**

- алюминий оксиді жабындарының құрылымына, фазалық құрамына, механикалық және трибологиялық қасиеттеріне детонациялық тозаңдандыру технологиялық параметрлерінің (ату жиілігі, бөшкенің толтырылу дәрежесі) әсері туралы жүйеленген тәжірибелік деректер алғаш рет алынды;

- алғаш рет детонациялық оқпанды жарылғыш қоспамен толтыру дәрежесінің төмендеуі жабындардағы  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  фазасының көлемдік үлесінің артуына, сол арқылы микроқаттылық пен тозуға төзімділіктің артуына әкелетіні анықталды;

- жарылғыш қоспамен детонациялық оқпанды толтыру деңгейін біртіндеп төмендету арқылы алюминий оксидінен градиентті жабын алудың жаңа тәсілі әзірленді. Бұл әдіс  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  фазасы төсеніштен бетке дейін жоғарылайтын құрылымы бар жабынды алуға мүмкіндік береді.

#### **Қорғауға шығарылатын негізгі қағидалар:**

1. фазалық құрамы  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  (аз мөлшерде) пен  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  тұратын алюминий оксиді детонациялық жабынын 1000-1200 °С температура аралығында жылулық өңдеу нәтижесінде көп мөлшерде  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  фазасы түзілетін құрылым-фазалық өзгерістер орын алып, жабынның қаттылығы мен тозуға төзімділігі артады.

2. детонациялық оқпанды жарылғыш қоспамен толтыру дәрежесін 68 %-дан 53 %-ға дейін төмендету нәтижесінде,  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  фазасының көлемдік үлесі артып, жабынның микроқаттылығы  $\sim 1,5$  есе ұлғайып, тозу қарқындылығы  $\sim 2,5$  есе төмендейді.

3. Детонациялық оқпанын жарылғыш қоспамен толтыру дәрежесін 68 %-дан 53 %-ға дейін біртіндеп азайту нәтижесінде жабынның беткі қабатына қарай  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  фазасының көлемдік үлесі артатын градиентті құрылымды алюминий оксиді жабыны түзіледі.

**Жұмыстың ғылыми және практикалық маңыздылығы.** Жүргізілген зерттеулердің нәтижелері айтарлықтай ғылыми және практикалық құндылыққа ие. Жұмыста алынған детонациялық тозаңданудың технологиялық параметрлерінің алюминий оксидінің жабындарының құрылымдық-фазалық күйіне және физикалық-механикалық қасиеттеріне әсерін кешенді эксперименттік зерттеулердің нәтижелері детонациялық технологияның одан әрі дамуына ықпал етеді және қызметтік қасиеттері жоғарылатылған алюминий

оксиді негізіндегі ұнтақ материалдарынан жабындар алудың технологиялық процесін жасау кезінде қолдануға болады.

Алюминий оксидінен градиентті жабындарды алудың әзірленген әдісі тозуға және коррозияға ұшыраған болат бұйымдарының өнімділігін жақсарту үшін пайдаланылуы мүмкін.

Әзірленген тәсіл пайдалы модельге патенттермен қорғалған «Детонациялық жабынды жағу тәсілі» (№6204. 02.07.2021 ж. жарияланған) және «Металдардың бетіне детонациялық жабын жағу тәсілі» (№6665. 12.11.2021 ж. жарияланған).

Диссертациялық жұмыстың нәтижесін ««ӨФ «BEST»» ЖШС (керамикалық зауыты) өндірісіне экономикалық әсерсіз енгізу актісі алынды.

**Диссертациялық жұмыс тақырыбының ғылыми-зерттеу жобаларымен байланысы.** Диссертация «Беттік инженерия және трибология» зертханасында және Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университетінің ұжымдық қолданыстағы Ұлттық ғылыми зертханасында (Өскемен қ., Қазақстан) және Дәулет Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан Техникалық Университетінің «Базалық инженерлік дайындық» факультетінде (Өскемен қ., Қазақстан) орындалды.

Зерттеу жұмысы гранттық және бағдарламалық-нысаналы қаржыландырудың мынадай жобаларын іске асыру шеңберінде жүргізілді:

ҚР БжҒМ Ғылым комитетінің қаржыландыруымен «Машина жасау бұйымдарына арналған тозуға төзімді материалдар алудың инновациялық технологияларын зерттеу және әзірлеу» тақырыбы бойынша, мемлекеттік тіркеу №BR05236748, Келісімшарт №197, 16.03.2018 ж.

**Автордың жеке үлесі.** Автордың жеке үлесі диссертациялық зерттеу тақырыбына арналған әдеби мерзімді басылымдарды іздеу мен талдаудан тұрады. Ғылыми кеңесшілермен бірге зерттеудің мақсаттары мен міндеттері анықталды, оксидті жабындарды зерттеу әдістері таңдалды. Диссертация авторы сынамаларды дайындауға тікелей қатысты, фазалық құрамын, бетінің морфологиясын зерттеді, беттің микроқаттылығы мен наноқаттылығын және алынған оксидті жабындардың тереңдігін өлшеді, сондай-ақ нәтижелерді талқылауға және басылымдарды жазуға қатысты. Алынған нәтижелерді талдау және негізгі қорытындыларды тұжырымдау ғылыми кеңесшілермен бірлесіп жүргізілді.

**Жұмыста алынған нәтижелер мен жасалған қорытындылардың сенімділік деңгейі және түсіндірмесі.** Жұмыста алынған нәтижелердің негізділігі мен сенімділігі мәселенің қойылуының түпнұсқалығы мен анықтығымен, жақсы тексерілген эксперименттік зерттеу әдістерін таңдаумен және қолданумен, эксперименттік мәліметтердің көлемімен және статистикасымен қамтамасыз етіледі. Зерттеу нәтижелері ашық түрде тексерілді: ғылыми журналдарда жарияланды, автор баяндама жасады және республикалық және халықаралық конференцияларда баяндады.

**Диссертациялық жұмыстың апробациясы.** Диссертациялық жұмыстың материалдары ғылыми конференцияларда баяндалды және талқыланды:



1. V - Республикалық ғылыми-техникалық конференция «Жаңа функционалдық материалдар, заманауи технологиялар және зерттеу әдістері», (Гомель. Беларусь, 2018);

2. XVIII - Халықаралық IUPAC симпозиумы Макромолекулалық-Металлкешендері (Мәскеу, 2019);

3. XIV - Халықаралық конференция «Жаңа материалдармен технологиялар: Ұнтақты металлургия, композициялық материалдар, қорғаныш жабындар, дәнекерлеу» (Минск, Беларусь, 2020);

4. VI - Халықаралық конференция «Лазерлік, плазмалық зерттеулермен технологиялар, - ЛАПЛАЗ-2020» (Мәскеу, 2020);

5. VI - Халықаралық ғылыми-техникалық конференция «Жастар шығармашылығы – Қазақстанның инновациялық дамуына» Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан мемлекеттік техникалық университеті (Өскемен, 2020);

6. VII - Халықаралық ғылыми-техникалық конференция "Жастар шығармашылығы-Қазақстанның инновациялық дамуы" Д.Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті (Өскемен. 2021);

7. Advanced materials manufacturing and research: new technologies and techniques (AMM&R2021) international conference to be hosted virtually by D.Serikbayev East Kazakhstan technical university (Ust-Kamenogorsk, 2021).

Бұдан басқа, диссертациялық жұмыстың негізгі нәтижелері физика кафедрасының ғылыми семинарларында, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан университетінің негізгі инженерлік дайындық факультетінің бірлескен ғылыми семинарларында, С. Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университетінің «Беттік инженерия және трибология» ғылыми-зерттеу орталығының ғылыми семинарларында баяндалып, талқыланды.

**Мақалалар.** Диссертация тақырыбы бойынша барлығы 14 ғылыми мақала, Қазақстан Республикасы Білім және ғылым министрлігі Білім және ғылым сапасын қамтамасыз ету комитеті бекіткен ғылыми басылымдарда 5 мақала, 2 мақала Coatings» (Q2) және «Materials Research Express» (Q3), Web of Science Core Collection (ClarivateAnalytics) және Scopus халықаралық ақпараттық ресурстарына енгізілген журналдарда жарияланған., халықаралық конференциялар материалдарының жинақтарында 7 мақала, пайдалы модельдерге 2 патент алынды.

**Диссертациялық жұмыстың құрылымы мен көлемі.** Диссертация кіріспеден, төрт тараудан, қорытынды мен пайдаланылған әдебиеттер тізімінен тұрады, барлығы 158 бет, 76 сурет, 19 кесте, 307 қолданылған әдебиеттер тізімі, 6 қосымша.

# **1 ГАЗОТЕРМИЯЛЫҚ ТОЗАҢДАНУ ӘДІСТЕРІМЕН $Al_2O_3$ НЕГІЗІНДЕГІ ЖАБЫНДАР АЛУ МӘСЕЛЕСІНІҢ ҚАЗІРГІ ЖАЙ-КҮЙІ (ӘДЕБИЕТТЕРГЕ АНАЛИТИКАЛЫҚ ШОЛУ)**

Соңғы он бес жылда қорғаныс жабындарын өзгертуге және жақсартуға бағытталған қосымша беттік өңдеу технологияларын зерттеуге және әзірлеуге айрықша назар аударылып отыр. Алюминий оксиді негізіндегі жабындарды одан әрі жақсарту үшін және осы мәселені шешудің бір жолы ретінде – детонация параметрлерін өзгерте отрып, алюминий оксидінен градиентті жабын алудың технологиясын әзірлеу, бұл әдіс жабынға жоғары қасиеттерді беруге мүмкіндік тудырады.

Бетті қорғайтын жабындарды бағалаудың нақты критерийлері: қаттылығы, төсенішке адгезиялық беріктілік, жылулық, коррозияға тұрақтылық, жылуөткізгіштік, қалдық кернеулер және т.б. жатады. Барлық қасиеттің бір мезгілде жоғары болуына қол жеткізу өте күрделі. Бұл аталғандардың біреуін жоғарылату, басқада қасиеттердің өзгерісіне әкелетіні сөзсіз. Барлық керекті қасиеттерді жоғарылату осы заманғы материалтанудың өзекті мәселелерінің бірі болып отыр. Сонымен қатар детонациялық жарылыс уақытында үдетілген композициялық ұнтақтардың өзара бір-бірімен әсерлесуі орын алатын физикалық процестерді зерттеу, технологиялық процестердің күн сайын дамуымен қатар келе жатыр. Тозаңдау процесі кезінде беттік жабын қабатында орын алатын құрылым-фазалық өзгерістер мен ішкі түйіршіктік ақаулардың пайда болуына және трибомеханикалық қасиеттерінің өзгерістеріне назар аударылады.

Соңғы онжылдықта газотермиялық тозаңдатудың іргелі негіздерін дамытудағы айтарлықтай прогреске, металл материалдарының беттік қасиеттерін жақсарту саласындағы қарқынды ғылыми зерттеулерге қол жеткізді.

Тарауда соңғы он бес жыл көлеміндегі заманауи әртүрлі технологиялардың көмегімен алынған градиентті жабындардың құрылымдық қасиеттерін зерттеудің заманауи жетістіктері туралы, сонымен бірге құрылым-фазалық күйдің қалыптасуы және алюминий оксиді негізіндегі қорғаныс жабындардың қасиеттері туралы соңғы жылдардағы деректер баяндалған.

## **1.1 $Al_2O_3$ негізіндегі жабындар және оның қолданылуы**

Машина жасау өнімінің бәсекеге қабілеттілігін қамтамасыз етудің қажетті шарты ретінде оның бөлшектерінің тозуға, және коррозияға төзімді беттерін алу, оларды пайдаланудың ұзақ кезеңі ішінде трибологиялық, электрлік, оптикалық, термиялық және өзгеде қызметтік қасиеттерді беру мен сақтау үшін беттік өңдеу технологияларын кеңінен енгізу болып табылады. Беттік өңдеу технологиясы және жабындарды тұндыру - «Беттік инженерия» саласындағы ірі ғылыми-техникалық бағыттың құрамдас бір бөлігі болып табылады [1-3]. Жабындар технологиясы бөлшектің негізгі материалынан өзгеше қасиетке ие басқа материалдардан жасалған үстіңгі қабаттарды (жабындарды жабуға) тұндыруға мүмкіндік береді. "Құрғақ және ылғалды" жабын жағу процестері бар. Экологиялық тұрғыдан жабынды алудың құрғақ әдістері қолайлы. Жабындарды

алу әдістерінің маңызды параметрі шөгетін жабындардың қалыңдығының диапазоны болып табылады. Бірнеше микрометр қалыңдығы бар жабындар жұқа деп аталады, ал қалыңдығы бірнеше ондаған микрометрден жоғары және бірнеше миллиметрден төмен жабындар – қалың деп саналады.

Жұқа жабындарды жағудың әдістері [1, 4-6] химиялық тұндыру (CVD), физикалық тұндыру (PVD) немесе пульсациялайтын лазерлік тұндыруды (PLD) қоса алғанда, газды немесе бу фазасының конденсациясына негізделген. PVD және CVD арқылы металл жабындарды алу XIX ғасырдың соңында пайда болды, ал қалың металл жабындарды балқыту және алудың газотермиялық тозаңдату (ГТТ) технологиялары XX ғасырдың басында пайда болды. Газотермиялық тозаңдату әдетте жоғары температуралы газ ағындарының көмегімен әртүрлі материалдардан жабындарды жағудың ұқсас процестерінің тобын біріктіреді. Газотермиялық жабындар (ГТЖ) бұйымдардың бетінің функционалдық қасиеттерін жақсартады. Газотермиялық тозаңдату технологиясының әмбебаптығы оны метал бұйымдарының кез келген бөлшектері мен компоненттері үшін іс жүзінде пайдалануға мүмкіндік береді. Газотермиялық тозаңдату әдістерінің дамуының бастапқы сатысында тигельді, газ жалынымен және электр доғалық тозаңдану техникасы қолданылды және оны іс жүзінде қолдану әдебиеттерде толықтай қарастырылған [7]. Алайда, қазіргі уақытта газотермиялық тозаңдатудың бірқатар жаңа әдістері кеңінен өнеркәсіптік қолдануға ие болды: плазмалық, жоғары жылдамдықты газ жалынды, суық газдинамикалық және т.б., олардың қолданылу аясы да айтарлықтай кеңеюде.

Доктор M.U. Schoor металдарды балқытуға және жабынды шөгуге арналған жабынды бет бағытында балқытпаның тамшылары түрінде жылжытуға қабілетті жабдықты әзірлеу бойынша жұмыс істеді. Бірнеше жылдан кейін доктор M.U. Schoor әріптестерімен оттегімен жанғыш қоспаның жануы кезінде пайда болатын жалында металл сымды балқытуға негізделген металл сымдармен тозаңдату үшін алғашқы термиялық тозаңдағыш қондырғысын жасап шықты. . Доктор M.U. Schoor газотермиялық тозаңдатудың дамуындағы рөлі Berndt [8] және Knight [9] жұмыстарында жақсы сипатталған. [10] жұмыста сұйық металдарды сығылған ауа немесе инертті газ ағысымен шашыратуды сипаттаса, жалынмен қыздырылатын металл немесе керамикалық ұнтақтарды [11], түрлі материалдардың сымдары мен шыбықтарын пайдалануды [12], екі сыммен электр доғалық тозаңдату процесін [13] сипаттады. Екінші дүниежүзілік соғыстан кейін қиын балқытын материалдардан жабын алу үшін температурасы жоғары газ ағындарын генерациялауға қабілетті газотермиялық тозаңдату техникасы талап етілді.

Газотермиялық тозаңдату әдістерінің үшінші тобы 1980 жылдары әзірленген және бұл материалдарды қатты фазада тозаңдату әдістеріне жатады. Мұнда бастапқы материал жоғары жылдамдықты газ ағынымен ұшып бұйымның бетіне жабын түрінде жағылады.

Қазіргі уақытта газотермиялық тозаңдатудың көптеген әдістері белгілі, бірақ өнеркәсіпте кеңінен қолданылатын негізгі әдістерге [14] зерттеулерде қарастырылған, атап айтқанда: жоғары жылдамдықты газ жалынды тозаңдату (HVOF), детонациялық тозаңдату (DS), ашық ауада плазмалық тозаңдату (APS),

вакуумдық плазмалық тозаңдату (VPS), төмен қысым кезінде плазмалық тозаңдату (PS), суық газдинамикалық (CGDS), жоғары жылдамдықты ауа-отын (HVAF) және жылы тозаңдату (WS).

1990 жылдардың соңында газотермиялық тозаңдау процестерінің қиын жағдайларында жұмыс істеуге қабілетті, қарапайым және сенімді датчиктері жасалды [15]. Ұшудағы бөлшектер параметрлері мен жабындардың қасиеттері арасындағы өзара байланысты қарқынды зерттеу [16] жабындыларды қалыптастыру механизмдерін терең түсінуге және жабындылардың технологиялық қайта өңдеуі мен сенімділігін жақсартуға алып келді [17]. Алайда, газотермиялық тозаңдату операциялық параметрлерінің жабындарының қасиеттерімен байланысын анықтау әлі аяқталған жоқ.

Жабындардың құрылымы, механикалық, жылу-физикалық және өзгеде қасиеттері, олардың негізгі материалмен жабысу беріктігі жабынның бастапқы материалының құрылымы мен қасиеттерімен және бөлшектің бетімен соғылу процесіне, оның ішінде материалдардың өзара әсерлесуімен анықталады. Осы уақытқа дейін тұрақты балқу температурасын (мысалы, кремний карбиді мен нитридi) қоспайтын керамиканы тозаңдату бойынша, олардың ауадағы тозаңдату процесінде сублимациялау немесе ыдырау мүмкіндігі салдарынан шектеулер бар. Бұл шектеулер жақында газотермиялық тозаңдатуда керамикалық ұнтақтарды қорғағыш жабын ретінде алудың жаңа технологияны әзірлеуге итермелейді. Бұл технология газотермиялық тозаңдатуға тұрақты балқу температурасы жоқ керамикалық жабындарды алуға мүмкіндік береді, әрбір жеке керамикалық бөлшектерді жылудан қорғағыш ретінде рөл атқаратын материалды қолданады [18].

[19] зерттеуге сәйкес жабындарды қыздыру арқылы бетті өңдеуге арналған перспективті материалдар олар – металл оксидтері, өйткені басқа жоғары температуралық материалдармен (боридтермен, нитридтермен, силикаттармен және карбидтермен) салыстырғанда төмен жылу өткізгіштігі мен электр өткізгіштігі, сонымен қатар жоғары температура кезінде коррозияға тұрақтылық және тозуға беріктікке айтарлықтай төзімділігі бар. зерттеу нәтижелері металл бұйымдарының бетін түрлендірудің тиімді бағыттарының бірі қатты, ыстыққа және коррозияға төзімді материалдардан жасалған ұнтақтарды тұндыру үшін газтермиялық технологияларды қолдану екендігін анықтаған [20]. [21] зерттеуде осы талаптарға жауап беретін болашағы зор және экономикалық тиімді жабындар алюминий оксидінің негізіндегі шикізаттан алынған керамикалық жабындар екендігі көрсетілген. Алюминий оксидінен алынған қорғаныш жабындарды алу - газ жалынды, плазмалық, газодинамикалық "суық", детонациялық, жоғары жылдамдықты және көп камералы детонациялық газотермиялық әдістердің бірімен іске асуы мүмкін [22]. Газ жалынды тозаңдану процестері салыстырмалы түрде жоғары кеуектілігі (5-12 %) және адгезиясы жоғары емес жабынды құрайды [23].

Термиялық тозаңдау – бұл машиналардың үйкелетін элементтерінің қызмет ету мерзімі мен сенімділігін арттыру үшін жабындарды шашыратудың кең таралған әдісі [24], олардың әрқайсысының өзіндік артықшылықтары мен кемшіліктері бар. Алюминий және титан оксидтерінтермиялық шашыратуға

негізделген композициялық жабындар абразивтік тозудан, эрозиядан және жоғары температураларда сырғу үйкелісі кезіндегі тозудан сақтайды [25].

Керамика тамаша химиялық тұрақтылыққа және жоғары тозуға төзімділікке ие болғандықтан металл төсеніш ретінде қолдануға тиімді жабын материалы болып табылады [26, 27]. Сондықтан, CoCrMo қорытпасының төсенішіндегі керамикалық жабындар металл төсеніштен металл иондарының бөлінуін тиімді түрде жояды, еркін пішінді бетке қол жеткізе алады және металл ортопедиялық импланттардың трибологиялық өнімділігі мен коррозияға төзімділігін жақсартып алады.  $Al_2O_3$  және  $ZrO_2$  керамикалары биомедициналық қолданбаларда тамаша тозуға және коррозияға төзімділікке ие [28, 29].

$Al_2O_3$  - тозуға төзімді керамикалық жабын болғанымен, кей жағдайда оның қаттылығы жеткіліксіз болады.  $Al_2O_3$  керамикасына тиісті мөлшерде  $TiO_2$  қосу, оның қаттылығын, тығыздығын және жабысу беріктігін жақсартатындықтан, абразивті төзімділікті арттыруға пайдалы. Сондықтан  $Al_2O_3$ - $TiO_2$  жабыны авиация, химиялық талшық өнеркәсібінде және басқа салаларда кеңінен қолданылады [30-32].

Газтурбиналық қозғалтқыштардағы бөлшектерді жылудан қорғау жабындары (ЖҚЖ) материалтану және технология саласындағы күрделі жүйелердің бірі болып табылады. Турбина қозғалтқышының компоненттеріндегі жылудан қорғау жабындары жоғары температураларда оны пайдалану кезінде механикалық жүктемелерге және агрессивті немесе эрозиялық ортаның әсеріне ұшырайды. Осылайша, жылудан қорғау жабындары қозғалтқыш компоненттерінің беріктігі мен өнімділігін арттыру үшін жоғары қаттылыққа, трибологиялық сипаттамаларға, құрылымдық тұрақтылыққа және жылу оқшаулауына ие болуы керек [33, 34]. Жетілдірілген трибологиялық қасиеттерге қол жеткізу үшін керамика негізіндегі жабындармен бейімделген жылудан қорғау жүйесі пайдаланылады [35, 36]. 8YSZ, 20 моль%  $Y_2O_3$  тұрақтандырылған  $ZrO_2$  (20YSZ) және  $Al_2O_3$ - $ZrO_2$  жабындары да хромдалған корпусқа қарсы шойын негізіндегі төсемдерге қарағанда тозуға төзімділігі жоғары материал ретінде қолданылған [37].

Қозғалтқыштардағы ЖҚЖ әсерінде ішкі жану қозғалтқышының тиімділігі мен қызмет ету мерзімі артады [38]. Қозғалтқыш цилиндрінің поршенінің тозуы кезінде  $Al_2O_3$ -ке  $ZrO_2$  (40 көлем %) қосылып қапталған жабынның тиімділігінің жоғары екені анықталған. Құмды үйкеліс (абразия) кезінде  $Al_2O_3$  қаттылығы жоғарылауы (22,0 ГПа) арқасында басқа инженерлік керамиканың көпшілігін (мысалы,  $ZrO_2$ ,  $Cr_2O_3$ ,  $TiO_2$ ,  $SiO_2$ ,  $TaB_2$ ,  $TaN$ ,  $W_2C$ ,  $TiN$  және т.б.) басып озды [39, 40]. Әрі қарай, монолитті  $ZrO_2$  жабындарымен салыстырғанда  $Al_2O_3$ - $ZrO_2$  композиттік жабынындағы  $Al_2O_3$  массасының 71,5% массалық мөлшерінде тозуға төзімділіктің жақсаруына (~6,0 есе) қол жеткізілді. Бұл, ең алдымен,  $Al_2O_3$ - $ZrO_2$  (~9,3 ГПа) композитінің қаттылығының (~2,8 есе) жоғарылауы  $Al_2O_3$ -нің реттелген функционалдылық тобының араласу қатынасының жоғары болуымен байланысты, Сонымен қатар, керамиканың тозуға төзімділігі көміртекті нанотүтікшелермен (КНТ) оңтайлы арматуралау арқылы артады [41]. Сол сияқты, механикалық, жылу және трибологиялық қасиеттері жақсартылған  $Al_2O_3$ , 3YSZ, 8YSZ және КНТ (CNT) негізіндегі жылудан қорғағыш жабындар

алынып, бұрынғы зерттеулер -  $Al_2O_3$  негізіндегі жылудан қорғағыш жабындарға 3YSZ, 8YSZ және КНТ (CNT) қосып күшейту кезінде механикалық және жылу қасиеттерінің жақсарғанын растайды [42]. Лазерлік қайта балқытумен және плазмалық тозаңдатумен нанокұрылымды жабындардың технологиялық параметрлері мен сипаттамаларын қалыптастыруға және оңтайландыруға болады [43, 44].

[45] жұмыста лазерлік қайта балқыту керамикалық жабынның фазаларын да өзгертеді. Ол плазмалық тозаңдау қабатындағы  $\gamma-Al_2O_3$  метатұрақты фазасын тұрақты күйге  $\alpha-Al_2O_3$  өзгертеді.  $\alpha-Al_2O_3$  ыстық коррозия реакциясының қозғаушы энергиясы жоғары болғандықтан, салыстырмалы түрде жоғары пропорция  $\alpha-Al_2O_3$  тұрақты фазасы жабынның ыстық коррозияға төзімділігін арттыруға қолайлы [46].

Таза металдар немесе қорытпалардағы керамикалық жабындарды  $CO_2$ -лазермен балқытуды негізінен олардың механикалық қасиеттерін жақсарту мақсатында біршама ғылымдар зерттеген [47, 48]. Бұл өткізгіш құрылғыларда, мысалы, магниттер және оларды қоректендіретін ток өткізгіштер, бөлме температурасында немесе криогендік температураға дейін жұмыс істейтін жылу өткізгіш қосылыстар үшін өте маңызды [49, 50].

Плазмалық тозаңдау әдісімен алынған  $Al_2O_3$  жабыны қаттылығы, беріктігі, тозуға және эрозияға төзімділігі жоғары болғандықтан кеме авиациясында, аэроғарышта, авиацияда кеңінен қолданылады, оның [51, 52].  $Al_2O_3$  жабындысымен салыстырғанда  $Cr_2O_3$  жабыны тозуға, химиялық тұрақтылыққа және коррозияға төзімділікке ие [53]. Өнімділік пен құнын төмендету талаптарына сәйкес  $Cr_2O_3-Al_2O_3$  композициялық жабыны пайда болды. Yang және басқалар  $Cr_2O_3-Al_2O_3$  тұратын күшті адгезияға және аз кеуектілікке иесонымен қатар жабынға күрделі механикалық қасиет беретін  $Cr_2O_3$  және  $Al_2O_3$  қатты ерітіндісін түзетін композициялық жабын алды [54].

$Al_2O_3$  жоғары температурада құрамында C, Hf, Al және басқа белсенді элементтер бар суперқорытпалармен жақсы химиялық тұрақтылығына байланысты бетті қаптауға тамаша материал болып табылады [55].  $Al_2O_3$  жабындары керамикалық төсеніш композиттерінде, турбина қалақшаларына, тозуға төзімді жабын ретінде [56] және ыстық коррозияға төзімділігімен [57] ерекшеленеді. Әдетте  $Al_2O_3$  қабаты YSZ термиялық тосқауыл жабынының бетіне тікелей шашыратылады, бұл  $Al_2O_3$  пен YSZ жабынының қосылу беріктігін аздап төмендеткенімен, жылу циклінің қызмет ету мерзімін жақсартады [58].

$Al_2O_3$ -өткізгіштікке қабілетті балқытылған күйдегі иондық кристалл.  $NbV_2$  және  $Al_2O_3$  комбинациясы олардың жеке формаларына қарағанда соққыға төзімділігі, механикалық беріктігі және сыну тұтқырлығы жақсарған [59]. Металл боридтерінің соққыға төзімділігі, иілу беріктігі және сыну тұтқырлығы  $Al_2O_3$  қосу арқылы тиімді жетілдірілуі мүмкін, бұл  $Al_2O_3$  күшейтілген борид композиттеріне жоғары температуралы құрылымдық материалдар мен тозуға төзімді бөлшектерді қолдануда керемет перспективаларды көрсетуге мүмкіндік береді [60, 61].

Таза  $Al_2O_3$ -тен басқа, қазіргі уақытта  $Al_2O_3+TiO_2$  керамикасына, соның ішінде  $Al_2O_3 + 13$  мас.% және 40 мас.%  $TiO_2$  қоспасы қолданылуда. Жалпы алғанда,  $TiO_2$  мөлшерінің жоғарылауымен ұнтақтардың балқу қабілеті анағұрлым қолайлы, сондықтан тығыз және ақаусыз жабындарды тұндыру оңайырақ. Сонымен қатар,  $Al_2O_3$  негізіндегі жабындарға титан қосу, сыну тұтқырлығын жақсартып, материалдың тозуға төзімділігін арттырады 44 мас.%  $TiO_2$  жағдайында  $Al_2TiO_5$  фазасының түзілуі жүріп, сұйылтылған қышқылдарда коррозияға жақсы төзімділікке ие жабын алынады [62].

S-HVOF [63, 64] шашыратқан  $Al_2O_3$  зерттеулері бұл жабындардың тығыздығы жоғары және адгезиясы жақсарғанын және қарапайым APS немесе HVOF-пен салыстырғанда микроқұрылымы жақсарғанын көрсетті [65]. HVOF көмегімен суспензияны шашыратудың тағы бір артықшылығы – бұл мүмкіндік бастапқы кристалды фазаның сақталуы. Бұл өте маңызды, әсіресе  $Al_2O_3$  жағдайында, өйткені тозаңдау кезінде бұл материал бастапқы термодинамикалық тұрақты  $\alpha$  фазасынан метастабильді коррозияға төзімділігі төмен  $\gamma$  фазаға айналады [66]. Сұйық шикізатты шашыратуға арналған зерттеулердің көпшілігі SPS [67, 68] және S-HVOF  $Al_2O_3$  жабынына қатысты екенін атап өткен жөн. Мұндай жабындарға  $TiO_2$  қосудың әсерін қарастыратын бірнеше жұмыс бар [69, 70].

[71, 72] зерттеуде  $Al_2O_3 + 13$  мас.%  $TiO_2$  SPS, ал Vicent және т.б. осыған ұқсас жабындарда микроқұрылым мен наноиндентация қасиеттері сипатталған. Шикізат сипаттамалары шашыраудың пайда болуына үлкен әсер ететінін анықтады [73]. Бастапқы ұнтақтың мөлшеріне, суспензияларды дайындау әдісіне байланысты, бөлшектердің мөлшері бойынша таралуы және т.б. әртүрлі микроқұрылымдық қасиеттерді алуға болады [63]. Сонымен қатар, әдеттегі ұнтақты термиялық тозаңдау процестерімен салыстырғанда, суспензияға негізделген технологиялар бастапқы материалдың микроқұрылымы мен химиялық құрамына бейімделудің жоғары икемділігін көрсетеді [74]. Мысалы,  $Al_2O_3$  және  $Al_2O_3+TiO_2$  негізіндегі шашыратылған APS жабындары салыстырмалы түрде кеуекті, бұл кейбір қосымшаларда, мысалы, электроника мен тығыздау жүйелерінде қажет емес [75, 76]. Суспензияға негізделген жабындар мұндай мәселелердің қызықты шешімі болып көрінеді. Сұйық шикізатты шашыратуға арналған зерттеулер [77, 78] қазірдің өзінде бұл процестер салыстырмалы немесе тіпті жақсы қасиеттері бар жұқа жабындарды, соның ішінде қаттылықты, коррозияны немесе тозуға төзімділікті қамтамасыз ете алатындығын көрсетті.

Соңғы зерттеулер радарларды анықтау технологиясының қарқынды дамуына байланысты радиолокациялық жасырын технологияларды зерттеуге көбірек көңіл бөлінетінін көрсетті. Сонымен қатар, жоғары температурадағы микротолқынды жұтатын материалдарды зерттеген зерттеушілер саны артып келеді [79, 80]. Плазмалық тозаңдау әдісімен дайындалған жоғары температураны сіңіретін жабын жақсы сіңіру өнімділігіне ие [81, 82].  $Al_2O_3$  және  $MoSi_2$  жоғары температураға тамаша төзімділігіне байланысты жоғары температураға төзімді жабындарда кеңінен қолданылады [83-85].

[86] жұмыста цилиндрлі поршенді топ бөлшектеріндегі (ЦПТ) және локомотив қозғалтқыштарының жану камерасының элементтерін, плазмалық қорғаныс жабындыры көмегімен тозуын 3-4 есе азайтуға, жұмыс істеу мерзімін арттыруға, қозғалтқыштың техникалық сипаттамаларын күшейтуге едәуір тиімді деп көрсетілген. Агломерацияланған  $Al_2O_3$  керамика электр оқшаулағыштары, отқа төзімді материал және т.б. ретінде тиімді, ал металл төсенішке жағылған  $Al_2O_3$  жабындары тозуға және коррозияға төзімділікті арттырады [87]. [88] зерттеуде плазмамен шашыратылған  $ZrO_2$  металл төсеніштерге жақсы қолданылатын жабын екені жазылған, бұл оның жақсы жылу оқшаулағыш және соққыға төзімділік сипаттамаларына байланысты [89]. Дегенмен,  $ZrO_2$  жабыны төмен қаттылыққа байланысты тозуға және соққыға қолдануда қажеттілікті толық қамтамасыз ете алмайды, сол себептіде  $Al_2O_3$ - $ZrO_2$  композиті жабын қолдану жоғары артықшылыққа жеткізген [90].

$Al_2O_3$  негізіндегі керамикалық жабын металл материалдардың жоғары беріктігі мен пішінін тозуға төзімділікпен органикалық түрде үйлестіре алады [91-93]. Электр оқшаулау саласында  $Al_2O_3$  жабындары коррозиядан және тозудан қорғау мақсатында пайдаланылады [94]. Бу турбинасының өнімділігін арттыру материалдарды әзірлеуге және беттерді жобалауға байланысты соңғы онжылдықта болат төсеніштерді жоғары температурадан қорғау үшін термиялық тозаңдау жабындарын қолдану маңызды [95, 96].  $Al_2O_3$  және NiAl металл керамикасына негізделген жабындар жоғары температуралы коррозиядан және тозудан қорғауды қамтамасыз ететін тамаша материал болып табылады [97]. Бүмен тұндырылған немесе термиялық шашыратылған MCrAlY (m-никель, кобальт немесе екеуі де) және  $Al_2O_3$  қосылған жабындары жер үсті газ турбиналарының немесе авиациялық қозғалтқыштардың ыстық бөліктеріне ыстық коррозиядан және тотығудан қорғау үшін қолданылды [98, 99].

## **1.2 $Al_2O_3$ негізіндегі жабынды алуда қолданылған әдістер мен талдаулар**

Алюминий оксидінен қорғаныш керамикалық жабындарды қалыптастыру - жоғары жылдамдықты газ жалынды, ауа плазмалық, плазмалық және детонациялық тозаңдау т.б. тұратын газтермиялық әдістердің бірі арқылы іске асырылуы мүмкін.

### ***Плазмалық тозаңдану.***

[100] зерттеулерде плазмалық тозаңдаумен материалдардың кең спектрінен жабын алатыны атап өтілді. Бұл әдістің негізгі кемшіліктеріне электр энергиясын пайдаланудың төмен коэффициенті (0.001-0.020 ұнтақтары бойынша); жабынның қатпарлығы (кеуектілігі), жабынның төсенішпен және жабынның өз-өзіне жабысуының төмендігі болып отыр [101].

***Жоғары жылдамдықты газ жалынды тозаңдату (ЖЖГЖТ) (HVOF).*** әдісі алғаш рет «Union Carbide» фирмасымен 1950 жылдардың ортасында жасалған. Детонациялық-газды сәулелендіруге қарағанда, жоғары жылдамдықты газ жалынды тозаңдату құрылғысы үздіксіз жану режимінде жұмыс жасайды, бұл оның жоғары өнімділігін қамтамасыз етеді. ЖЖГЖТ құрылғысының жұмыс принципі [102, 103] зерттеулерде берілген. [102,103] жұмыста көрсетілгендей,



HVOF әдісі жоғары жылдамдықпен ( $400 > 800$  м/с), бірақ төмен температурамен ( $3000 > 15000$  К) және басқа газотермиялық әдістермен салыстырғанда алынатын жабынның ең аз кеуектігімен (1 – 4%) сипатталады. Алайда, HVOF-тың белгілі құрылғылары мен технологияларының кемшілігі олардың энергия сыйымдылығын және 4 МПа қысымдағы газды пайдаланады [104]. [105] зерттеуде көрсетілгендей, жүйенің жұмысқа қабілеттілігінің жақсаруы салқындатқыш жүйесін қиындатады және неғұрлым энергия шығыны кетеді, бұл сайып келгенде жабындар құнының өсуіне әкеледі. Газ жалынды тозаңдану процестері салыстырмалы түрде жоғары кеуектілігі (5-12 %) және адгезиясы жоғары емес жабынды құрады [106]. Бұл газ ағысының аз жылдамдығына байланысты (50 м/с жуық) [107]. Сонымен қатар, газ жалынды тозаңдаудың негізгі артықшылықтары, кең таралуды қамтамасыз ететін, жабдықтың қарапайымдылығы мен сенімділігі, сондай-ақ мобильділік болып табылады [108]. Бұл әдістің елеулі кемшіліктері: қалыпты үзіліске сынау кезінде жабындардың төсенішпен (5-45 МПа) адгезиялық беріктігі төмен; қосымша өңдеусіз агрессивті орталарда жабынды қолдануға кедергі келтіретін кеуектіктің болуы (5-25% шегінде); ұнтақты қыздыруға арналған газ жалынның энергиясын пайдаланудың төмен коэффициенті (2-12%); балқу температурасы  $2800^{\circ}\text{C}$ -ден жоғары, қиын балқитын материалдардан жабындар алудың мүмкін еместігі болып отыр [109].

**Электродоғалы тозаңдату.** Бұл әдісте оқпанға тұрақты берілетін екі электродты сымдардың арасында байланыс жасайтын электр доғасы қолданылады. Сымдардың екі ұшының арасында жанатын электр доғасы әсерінде оларды балқытады, жоғары жылдамдықты ауа ағыны оларды шашыратып, балқыған металл бөлшектерін бұйымның бетіне жағады. Жабындардың кеуектілігі өңдеудің әсерінде жақсартылуы мүмкін [110].

**Суық тозаңдату.** 1980 жылдар соңында әзірленген газотермиялық тозаңдату әдісі тозаңдату процесінде балқытпаяқ бөлшектердің жоғары кинетикалық энергиясын пайдалану арқылы жабынды алуға арналған. Газотермиялық тозаңдаудың басқа әдістерінен негізгі айырмашылығы жабындардың қалыптасуы тозаңданатын материалдың температурасынан едәуір төмен температураларда жүзеге асырылады, бұл материал бетіне ірі ұнтақтың бөлшектерін айтарлықтай енгізуге мүмкіндік береді, олар материалды бір мезгілде «тиімді» жүргізуге мүмкіндік тудырады. Беттерді дайындау тұрғысынан бұл схема оңтайлы болып табылады.

[111] жұмыста осы әдістің артықшылықтары белгіленген.

Машина жасау саласында 80%-ға жуық бөлшектерін коррозиядан, тозудан және жоғарытемпературалық тотығудан сонымен бірге арнайы мақсатта қорғау үшін металдық, керамикалық, полимерлік немесе композиттік жабындар алынады (Сурет 1).



Сурет 1 – Түрлі мақсаттағы жабындарды қолдану аясы



Сурет 2 – Жабынды жағудың түрлі әдістерін қолдану кеңдігі

Машина жасау бұйымдарына газотермиялық тозаңдату, химиялық және электрохимиялық, физикалық (PVD) және термохимиялық (CVD) тұндыру және т.б. технологиялары бойынша жағылатын жабындар кеңінен қолданылады (Сурет 2).

Жабындарды жағудың ең қарқынды дамып келе жатқан технологиялары газотермиялық тозаңдату, физикалық (PVD) және термохимиялық (CVD) тұндыру, лазерлік балқытулар болып табылады. Газотермиялық тәсілдермен алынатын жабындардың ерекшеліктері мен қасиеттері 1 - кестеде келтірілген.

Кесте 1 – Газотермиялық тәсілдермен алынатын жабындардың ерекшеліктері мен қасиеттері

| Жабын түрі  | Газжалынды | Детонациялық | Электр доғалы | Плазмалық   | Бақыланатын атмосфера |
|---|------------|--------------|---------------|-------------|-----------------------|
| Газ температурасы, °С                               |            |              |               |             |                       |
| 1   | 2          | 3            | 4             | 5           | 6                     |
| Барлық жабындар                                     | 2000       | 2800-3000    | -             | 10000-16000 | 10000-80000           |
| Жалғасу беріктігі                                   |            |              |               |             |                       |
| Болат   | 14-21      | 48-62        | 28-41         | 22-34       | 100-400               |
| Темір емес қорытпалар                               | 7-34       | 48-62        | 14-28         | 14-28       | 400-750               |
| Өздігінен балқитын қорытпалар                       | 83+        | 62**         | -             | -           | -                     |
| Керамика  | 14-32      | -            | -             | 21-41       | 25-55                 |
| Металокерамика                                      | 34-48      | 83+          | -             | 55-69       | 500-100               |
| Жабын тығыздығы, % жинақы материалмен салыстырғанда |            |              |               |             |                       |
| Болаттар  | 85-90      | 95-98+       | 85-95         | 90-95       | 97-99+                |
| Негізі темір емес қорытпалар                        | 85-90      | 95-98+       | 85-95         | 90-95       | 97-99+                |
| Өздігінен балқитын қорытпалар                       | 100*       | 98+**        | -             | -           | -                     |
| Керамика  | 90-95      | -            | -             | 90-95+      | 95-98                 |
| Металокерамика                                      | 85-90      | 95-98+       | -             | 90-95       | 95-98+                |
| Қаттылық, (HRD-, HRC-,)                             |            |              |               |             |                       |
| Болаттар  | 80'-35"    | 90'-45"      | 85'-40"       | 80'-40"     | 30'-50"+              |

1-кестенің жалғасы

|                                   |         |          |         |         |          |
|-----------------------------------|---------|----------|---------|---------|----------|
| Негізі темір емес қорытпалар      | 30'-20" | 100'-55" | 40'-35" | 40'-50" | 45'-55"  |
| Өздігінен балқитын қорытпалар     | 30'-60" | 50'-60"  | -       | -       | -        |
| Керамика                          | 40'-65" | -        | -       | 45'-65" | 50'-70"  |
| Металокерамика                    | 45'-55" | 55'-72"  | -       | 50'-65" | 50'-70"+ |
| Ұсынылатын жабынның қалыңдығы, мм |         |          |         |         |          |
| Болаттар                          | 0.5-2.0 | 0.6-2.5  | 0.5-2.5 | 0.4-2.5 | 0.05-10+ |
| Негізі темір емес қорытпалар      | 0.5-2.0 | 0.6-2.5  | 0.5-2.5 | 0.4-2.5 | 0.05-10+ |
| Өздігінен балқитын қорытпалар     | 0.4-2.5 | 0.4-3.6  | -       | -       | 0.1-15+  |
| Керамика                          | 0.4-0.8 | -        | -       | 0.4-5.0 | 0.05-10+ |
| Металокерамика                    | 0.4-0.8 | 0.4-5.0+ | -       | 0.4-5.0 | 0.05-10+ |

Газотермиялық тозаңдануда қолданылатын жабдықтар мен процестердің түрлері көп, зертеулерде сипатталған [14, 112]. 2-Кестеде газотермиялық тозаңдау әдістері және кейбір сипаттамалары, сондай-ақ алынатын жабындар туралы жазылған.

Кесте 2 – Газотермиялық тозаңдану әдістерінің салыстырмалы сипаттамалары

| Газотермиялық тозаңдау әдісі   | Газ ағысының параметрлері (Т, °C/V, м/с)   | Газ ағысының қуаты, кВт | Тоzaңданатын материал (Т <sub>max</sub> , °C/V <sub>p</sub> , м/с) | Кеуектілігі %, қалыңдығы мкм                                |
|--|--|-------------------------|--|---|
| Газ жалынды тозаңдау (оттегі, ацетилен, пропан, сутегі)  | 3500/ 80-100                               | 20                      | 2500/ 50-100   | 10-15; 0 (өздігінен балқитын қорытпалар үшін)/ 100-2500 мкм |
| Электрдоғалы тозаңдау (ауа, азот, аргон)   | >6000/ 50-100                              | 5...10                  | >3800/ 50...150  | 10-20 / 100-200 мкм   |
| Детонациялық тозаңдау (оттегі, ацетилен, пропан, сутегі, бутан)  | >4000/ >2500                               | -                       | -/ 750 ... 1000  | <2/ 100 ... 400   |
| Жоғары жылдамдықты газ жалынды тозаңдау (O <sub>2</sub> , табиғи газ, C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> , H <sub>2</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> ) | 2500 – 3000 / 500 - 2000                   | 150-3000                | 3300/200 ... 1000  | <2/50 ... 2000  |
| Ашық ауада плазмалық тозаңдану (Ar, He, H <sub>2</sub> , N, қоспалар)  | 10000 ... 15000 / 300 ... 1000             | 40 ... 200              | >3800 / 50 ... 100   | 5 ... 10 / 100 ... 1500                                     |
| Суық тозаңдану   | 0 ... 700 (алдын ала қыздыру)/300 ... 1200 | -                       | 250 / 500  | <5 / 250 ... 600  |

Жоғарыда қарастырылған әдістердің ішінен керамикалық жабындарды алуға жиі қолданылатын бірнеше әдістерді іріктеп алып, келесідей Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

негіздегі және басқада ұнтақтарды қосу арқылы алынған жабындарды зерттеу бойынша әдебиеттік шолу жасалынды. Керамикалық жабын алуға қолданылған әдістердің алынған жабынның құрылым-фазалық және механикалық қасиетке әсері, сондай-ақ  $Al_2O_3$ -дің қосылуының басқа ұнтақпен қосылу кезіндегі әсері, фазалық өзгерісі талданып көрсетілді.

1.2.1  $Al_2O_3$  негізіндегі жабындарды ауа плазмалық тозаңдату (APS) арқылы алу

[113] жұмыста  $Al_2O_3$ - $TiO_2$  ұнтағын газ жалынды және плазмалық әдіспен тозаңдап, олардың механикалық және трибологиялық қасиеттері салыстырмалы зерттелген, алынған жабынның микроқаттылығы газ жалынды тозаңдаудан кейін  $Al_2O_3$  жабыны үшін  $9,9 \pm 1,4$  GPa,  $Al_2TiO_5$  жабыны үшін  $8,0 \pm 0,5$  GPa-ды, кеуектілігі 3.2 %-ды, тозу жылдамдығы  $I=20.8 \cdot 10^{-5} \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ -ді, плазмалық тозаңдаудан кейін  $Al_2O_3$  жабыны үшін  $10,1 \pm 1,1$  GPa,  $Al_2TiO_5$  жабыны үшін  $7,9 \pm 0,7$  GPa-ды, кеуектілігі 5.1 %-ды, тозу жылдамдығы  $I=44.2 \cdot 10^{-5} \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ -ді көрсеткен.

[114] жұмыста CoCrMo қорытпасына плазмалық тозаңдау арқылы жасалған конформды керамикалық жабынның трибологиялық және коррозиялық сипаттамалары зерттеліп көрсетілген, ауа плазмалық тозаңдаудан кейін рентген-фазалық талдау нәтижелері  $\alpha$ - $Al_2O_3$  және  $\gamma$ - $Al_2O_3$  фазалары  $Al_2O_3$  жабын қабаттарында қатар өмір сүретінін және  $ZrO_2$  жабын қабаттарында тек  $t$ - $ZrO_2$  фазасы табылғанын атап көрсеткен.  $Al_2O_3$  жабыны үшін кеуектілігі 8.2%,  $ZrO_2$  жабыны үшін 6.3% және  $Al_2O_3$ - $ZrO_2$  жабыны үшін 4.2% көрсеткені айтылған. Акустикалық эмиссия қисықтары қалыпты күштің критикалық мәндері сәйкесінше қабыршақтанғанға дейін  $Al_2O_3$ - $ZrO_2$ ,  $ZrO_2$  және  $Al_2O_3$  жабындары үшін шамамен 77 Н, 68 Н және 58 Н құрайтынын көрсеткен. Жәнеде жабысу күші 238 МПа, 219 МПа және 199 МПа болғаны анықталған, микроқаттылығы  $Al_2O_3$  жабынында 893 (HV),  $ZrO_2$  жабынында 796 (HV) және  $Al_2O_3$ - $ZrO_2$  жабынында 1038 (HV) көрсеткен,  $Al_2O_3$ - $ZrO_2$  композициялық жабынының тозуға төзімділігі CoCrMo қорытпасынан кемінде үш есе жоғары және 238 МПа дейін тамаша адгезияға ие екені анықталған.  $Al_2O_3$ - $ZrO_2$  композициялық жабыны коррозияға төзімділіктің ең жоғары деңгейіне ие, оны тығыз микроқұрылымға, аз кеуектілікке және микрожарылыулардың көп емесігінен екендігін атап өткен.

Плазмалық әдіспен алынған  $Al_2O_3$  жабынының қаттылығы жеткіліксіз [115].  $Al_2O_3$  ұнтағына тиісті мөлшерде  $TiO_2$  қосу оның қаттылығын, тығыздығын және байланысын жақсартады, бұл беріктігі мен абразивті төзімділікті жақсарту үшін одан әрі пайдалы [116,117].

$Al_2O_3$  – 3 және 8 моль негізіндегі көміртекті нанотүтікшелерге (CNT) негізделген КМК жабындарын тегістеудегі тозу мүмкіншіліктері зерттелген [118]. Нәтижесінде жабындарының тозу жылдамдығы WC шарымен салыстырғанда  $0,97-1,87 \times 10^{-6} \text{ мм}^3 \cdot \text{н}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$  болды.  $Al_2O_3$ -3YSZ және  $Al_2O_3$ -8YSZ-CNT композиттік жабындарының арасында тозу жылдамдығы сәйкесінше  $0,97 \times 10^{-6} \text{ мм}^3 \cdot \text{н}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$  және  $1,06 \times 10^{-6} \text{ мм}^3 \cdot \text{н}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$  болатын жақсартылған тозуға төзімділік (~40,1% және ~34,5%) байқалды.

$\text{Al}_2\text{O}_3$  матрицасына тек CNT қосу нашар қаттылыққа және CNT мен  $\text{Al}_2\text{O}_3$  арасындағы әлсіз интерфейске байланысты тозуға төзімділікті одан әрі 15,4%-ға дейін төмендетеді. Дегенмен, YSZ және CNT синергетикалық әсері тозу жылдамдығын азайта отырып, жабындардың тозуға төзімділігін (40,1% дейін) жақсартады. Сондай-ақ, композит иілгіштігінің төмен индексіне (62,0 – 109,3 МПа) ие, тозу бетіндегі WC шарының кері қозғалысы салдарынан тозу шрамында тозу сызатының пайда болуы жайлы айтылған. Сайып келгенде, атмосфералық плазмалық тозаңдағыш  $\text{Al}_2\text{O}_3$ –20% көлемді 3YSZ жабыны басқа композиттер арасында тозуға төзімділігі бар термиялық тосқауыл жабындары үшін оңтайлы композит болып, кері айналмалы WC шарикіне қарсы тозу жылдамдығы жақсартылған (40,1% дейін) оңтайлы материал деп тапқан.

$\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ –25% $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ –16% $\text{Al}_2\text{O}_3$  (RubyL),  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ –35% $\text{Al}_2\text{O}_3$  (Ruby-S),  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ –10% $\text{ZrO}_2$  және  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ –20% $\text{ZrO}_2$  ұнтақтарды белгілі қатынаспен дайындап алып, плазмалық тозаңдау әдісін қолданып, жабын қабаты алынған [119]. Таза  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ –пен салыстырғанда,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ –25%  $\text{TiO}_2$  және  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ – $\text{ZrO}_2$  жабындары аз қаттылыққа ие,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ –16%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  жабыны таза  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  сияқты қаттылық пен беріктікке ие;  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ –35%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  жұмсақырақ, бірақ морт емес. Алайда соңғы әсер жоғары және орташа  $\text{Al}_2\text{O}_3$  құрамының орнына химиялық біртексіздігінің ( $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cr}_2\text{O}_3$  арақатынасындағы бөлшек-бөлшектердің өзгермелілігі) және осы шикізаттың бөлшектер өлшемі бойынша кең таралуының салдарынан болуы мүмкін деп бағаланған.  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  және  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ –16%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  таза жабындылары барлық басқа үлгілерге қарағанда төмен серпімділік модульге ие, сол себепті  $H/E$  және  $H^3/E^2$  коэффициенттері біршама жоғары. Түрлі салыстырулар сырғымалы тозу жағдайында болуына қарама-қайшы:  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  және  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ – $\text{Al}_2\text{O}_3$  жабындары жылдам тозады, ал  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ –25%  $\text{TiO}_2$  және  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ – $\text{ZrO}_2$  жабындары салыстырмалы түрде азырақ тозуға ұшырайды, барлық тозу жылдамдығы  $\geq 3,5 \times 10^{-4}$  мм<sup>3</sup>/(N·м) болса да, терең зондтау арқылы микроиндентация қысқа диапазондағы механикалық реакцияны анықтайтындықтан, осы сынақтан алынған параметрлер, оның ішінде қаттылық, серпімділік модулі және олардың қатынасы абразивті тозуға төзімділіктің жақсы болжамдары емес. Оның орнына қаттылық бақылау қасиетіне айналады деп сипаттаған.

[120, 121] жұмыста плазмалық тозаңдау арқылы наноқұрылымды  $\text{Al}_2\text{O}_3$ –13wt.%  $\text{TiO}_2$  керемикалық жабыныны алынып, оны лазерді қайта балқыту арқылы өңдеп ыстық коррозияға төзімділігін зерттеген, плазмалық тозаңдау арқылы дайындалған кәдімгі  $\text{Al}_2\text{O}_3$ –13 $\text{TiO}_2$  жабынымен салыстырғанда жақсы байланысу беріктігін және шамалы пластинкалық құрылымды көрсеткенімен, жабынның көптеген қуыстары бар және плазмалық тозаңдауға тән ақауларға байланысты жоғары кеуектілік. Демек, ыстық коррозия кезінде жабынның тесіктері, саңылаулары және микрожарықтары арқылы ішке қарай коррозияны жеделдету үшін тарай алады. Лазерлік қайта балқытудан кейін, пластинкалы құрылымдар мен қабат қуыстарының көпшілігі жойылады, ол арқылы біркелкі және тығыз жабын пайда болады. Осылайша, ыстық коррозияның таралуына арналған арналар азаяды, ыстық коррозияға төзімділігін арттырады деп көрсетілген [122]. Екінші жағынан, лазерлік қайта балқыту керемикалық

жабынның фазаларын да өзгертеді. Ол плазмалық тозаңдау қабатындағы  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  метатұрақты фазасын тұрақты күйге  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  өзгертеді [123]. Өйткені  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  ыстық коррозия реакциясының қозғаушы энергиясына қарсылығы жоғары болғандықтан [124],  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  тұрақты фазасының салыстырмалы түрде жоғары үлесі жабынның ыстық коррозияға төзімділігін арттыруға қолайлы деп атап көрсетілген.

[125] жұмыста мысқа плазмалық тозаңдаумен жағылған  $\text{Al}_2\text{O}_3$  жабындарының жылуға төзімділігін арттыруға, оларды криогендік жағдайда және бөлме температурасында n-IR лазерлік сәулеленуді қолдана отырып, керамикалық қабатты балқытуды қолдана отырып, жарықтардың болуын азайту және соңғы тығыз керамикалық қабатты алу үшін қолданылғаны айтылған. Лазермен өңделген үлгілердің жылу кедергісі плазмалық тозаңдатылған үлгілерге қарағанда шамамен үш есе төмен болғаны,  $0,95 \times 10^4$  және  $1,55 \times 10^4$   $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ -ге жететін жабындар, тиісінше 40 К және 77 К температураларда  $h_j$  жабынының жылу байланысының "эквивалентті" жылу өткізгіштігінің мәндері анықталған.

$\text{TiC}/\text{Al}_2\text{O}_3$  негізіндегі жабынды плазмалық тозаңдау әдісі арқылы электромагниттік толқынның сіңуі және электромагниттік толқынның энергиясын жылуға немесе энергияның басқа түрлеріне айналдыру арқылы бөлшек матрицаны қорғауға қолдануға болады [126].

[127] жұмыста үш композициялық  $\text{Al}-\text{Cr}_2\text{O}_3-\text{Al}_2\text{O}_3$  ұнтақты түрлі қатынаста араластыру арқылы плазмалық тозаңдауды қолданып жабын қабаты алынып, олардың микроқұрылымы мен коррозияға төзімділік қасиеттері салыстырмалы зерттелгені айтылған. Al-дің мөлшері 5-15% аралығында,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  мөлшері 58-66% аралығында және  $\text{Al}_2\text{O}_3$  мөлшері 25-28% аралығында болған, зерттеу нәтижесі  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  мөлшері мен  $\text{Al}_2\text{O}_3$  мөлшері сәйкесінше 66 және 28%, ал Al-дің мөлшері 15 тен 5%-ға азаю кезіндегі жабынның микроқұрылымында қуыстардың аз екендігін, сонымен бірге коррозияға тұрақтылығынында жоғары болғанын атап өткен.

Кремний негізіндегі керамикаға  $\text{Al}_2\text{O}_3$  жабындарын плазмалық тозаңдау және золь-гельді батыру әдістері қолданылып алынған [128]. Плазмалық тозаңдау арқылы алынған алюминий оксиді жабыны бетінің кедір-бұдырына әкелген, бір және екі қабат тозаңдау (тозаңдау) кезінде жабынның орташа кедір-бұдырлығы сәйкесінше 5,01 мкм және 6,01 мкм құрағаны айтылған.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  жоғары температурада құрамында C, Hf, Al және басқа белсенді элементтер бар суперкорытпалармен жақсы химиялық тұрақтылығына байланысты бетті жабуға яғни қорғағыш ретінде қолдану тиімді [129, 130].

[131] жұмыста 7YSZ қауырсын тәрізді бағаналы құрылым жабындары плазмалық тозаңдау-физикалық бу фазасын тұндыру (PS-PVD) арқылы алып, жабынның ыстық коррозияға төзімділігін арттыру мақсатында  $\text{Al}_2\text{O}_3$  модификациясын қолданған, микроқұрылымы мен фазалық өзгеріс нәтижелері  $\text{Al}_2\text{O}_3$  модификацияланған жабынның коррозияға жақсы төзімділік көрсететіні анықталған, сонымен бірге тозаңдатылған жабын мен  $\text{Al}_2\text{O}_3$  модификацияланған жабынның қаттылығы тиісінше 13,04 ГПа және 11,47 ГПа, серпімділік модулі сәйкесінше 133,00 ГПа және 129,60 ГПа болған.

Плазмалық тозаңдау әдісімен NbB<sub>2</sub>-NbC және Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> қосылған композиттік жабындары NbB<sub>2</sub>-NbC жабынға қарағанда жоғары микроқаттылыққа, жақсы қаттылыққа және тамаша тозуға төзімділікке ие болып, бұл негізінен композиттік ұнтақтың толық балқуына әкелетін нано-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> қосылуымен байланысты болуы мүмкін деп болжанған [132]. NbB<sub>2</sub>-NbC жабынының және NbB<sub>2</sub>-NbC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> жабынының микроқаттылығы сәйкесінше 874,1 HV<sub>0,1</sub> және 949,7 HV<sub>0,1</sub> болғаны көрсетілген. Қаптаманың микроқұрылымы мен кеуектілігі микроқаттылыққа негізгі әсер ететін факторлар екені белгілі [133]. Қатты фазалардың құрамы неғұрлым жоғары болса, жабынның қаттылығы соғұрлым жоғары болады. Қаптаманың кеуектілігі неғұрлым төмен болса, соғұрлым оның микроқаттылығы жоғары болады деп атап өткен. Төсеніш материалдың бетіне NbC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Nb-SiC және Nb-SiC-Al композиттік ұнтақтарын плазмалық тозаңдау арқылы алу NbC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> жабынның кеуектілігі 18.4%, Nb-SiC жабынында 9.3% және Nb-SiC жабыны үшін 6.1%-ды, ал NbC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> жабынының микроқаттылығы 904.4 (HV<sub>0.1</sub>), Nb-SiC - 1211.7 (HV<sub>0.1</sub>) және Nb-SiC-Al - 1235.6 (HV<sub>0.1</sub>) әкелген [134].

Құрамында әр түрлі алюминий тотығы (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)+TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+13 масса % TiO<sub>2</sub> және Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+40 масса % TiO<sub>2</sub> жабындары әр түрлі тозаңдай әдісімен зерттелген [135]. Нәтижесінде алюминий оксидінің α- және γ<sub>3</sub> модификациялық күйлерінде өзгеріс болғандығы байқалған. S-HVOF тозаңдау кезінде α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> фазаның көлемдік үлесінің артып, γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> фазаның салыстырмалы азайғанын, оны α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> фазаның ерімей қалған бөлшектерінің әсерінен деп болжаған.

[136] жұмыста жоғары температураға төзімді микротолқынды сіңіретін Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MoSi<sub>2</sub>/Cu композиттік жабынды атмосфералық плазмалық тозаңдау әдісімен алған, жоғары температурада Cu-тың және Cu<sub>2</sub>O түзілетін жабынның микротолқынды сіңіру қасиетін жақсарту алатынын, сонымен бірге жабынның микротолқынды сіңіру өнімділігі жақсы екенін 700°C температурада 10,5 ГГц жиілікте-19,09 дБ болды деп атап көрсеткен.

Әр түрлі құрамға ие Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> композициялық жабындарының үш түрі Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-35 мас. % ZrO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-40 мас. % ZrO<sub>2</sub> және Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-45 мас. % ZrO<sub>2</sub> ауа плазмалық тозаңдау кезінде (кеуектілігі Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-35 мас. % ZrO<sub>2</sub> жабында 5.5%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-40 мас. % ZrO<sub>2</sub> жабында 3.9% және Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-45 мас. % ZrO<sub>2</sub> жабында 4.2%-ды көрсеткен [137]. Сондай-ақ микроқаттылығы сәйкесінше 1195 HV, 1090 HV және 1030 HV артқан.

[138] жұмыста Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MoS<sub>2</sub> керамикалық жабынды плазмалық тозаңдау арқылы алып, оның механикалық трибологиялық қасиеттерін бағалаған. Зерттеу нәтижелері Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> жабынының бетінің кедір бұдырлығы 3.27 ± 0.11 μm, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MoS<sub>2</sub> жабыны үшін 1.86 ± 0.07 μm-ді құраған, наноқаттылықтары сәйкесінше 11.53 ± 0.37 және 12.39 ± 0.41 GPa, үйкеліс коэффициентінің мәні 0.58 және 0.36, сондай-ақ тозу көлемінің мәні 2.53\*10<sup>-4</sup> және 1.49\*10<sup>-5</sup> mm<sup>3</sup>(N\*m)<sup>-1</sup> екені салыстыра анықталған. Екі жабынның механикалық қасиеттерінде үлкен айырмашылық болмағанмен, трибологиялық зерттеу нәтижесіне қарап тозуға беріктігінің артқанын көруге болады.

1.2.2  $Al_2O_3$  негізіндегі жабындарды жоғары жылдамдықты газ жалынды тозаңдату (HVOF) арқылы алу

AISI 304 тот баспайтын болаттың бетіне  $Al_2O_3$  жабынын HVOF тозаңдау 80.06%  $\gamma-Al_2O_3$ , 19.94%  $\alpha-Al_2O_3$  фазаға ауысқан [139]. Жабынның микроқаттылығы  $7,4 \pm 0,3$  ГПа мен  $8 \pm 0,3$  ГПа өзгерген.

[140] жұмыста SS316L және AISI 52100 төсеніш болаттарға плазмалық және HVOF тозаңдау 10N, 15N және 20N жүктеме кезінде байқалатын тозу бойынша жабын жоғары нәтиже көрсеткен. Сондай-ақ микроқаттылығы плазмалық тозаңдауда 7.71 ГПа, HVOF тозаңдату бойынша 10.23 ГПа көрсеткен.

CoCrAlYTa-10%  $Al_2O_3$  және  $Cr_3C_2-NiCr$  ұнтақтарын HVOF тозаңдау үйкеліс коэффициентінің мәнін CoCrAlYTa-10%  $Al_2O_3$  жабыны үшін мөлшермен 0.5-ке,  $Cr_3C_2-NiCr$  жабыны үшін 0.7 өзгертіп, тозу көлемінің мәнін 3 есеге азайтып, микроқаттылықтың мәнін CoCrAlYTa-10%  $Al_2O_3$  жабыны үшін 680-736  $HV_{0.1}$ ,  $Cr_3C_2-NiCr$  жабынында 817-940  $HV_{0.1}$  арттырған [141]. Бұл  $Al_2O_3$  ұнтағының қосылуы қаттылыққа көп әсер етпегенімен, тозуға беріктілікті арттыратындығын көрсетеді.

AISI 304 тот баспайтын болат төсеніштің бетіне жоғары температура мен тозудан қорғайтын  $Al_2O_3-30(Ni20Al)$  негізіндегі жабынды HVOF әдісімен тозаңдау жабынның тығыз, ақаусыз және жақсы жабысқанын көрсетеді [142]. Сонымен бірге  $Al_2O_3-NiAl$  жабыны бар үлгілерде, жоғары температураны ( $850^\circ C$ ) ескере отырып, төсеніш материалда тозу байқалмаған. Алайда, осы температурада жабынның құрылымдық тұтастығы айтарлықтай өзгеріске ұшырағаны, жабынның стратификациясы жоғары жылу кернеуінің салдарынан аралық аймақта байқалған. Аралық жабын аймағында бұл жарықтардың пайда болуы төсеніштің тозуына жол бермегендігі айтылған. Термиялық өндеудің жабынға әсері оның тозуға төзімділігін NiO қатты фазасының пайда болуымен жақсарғанын рентген-фазалық талдау арқылы түсіндірген.

HVOF тозаңдау әдісімен алынған NiCoCrAlY жабынының физико-механикалық қасиеттеріне  $GeO_2$  және  $Al_2O_3$  нанобөлшектерінің әсерін зерттеу барысында,  $GeO_2$  және  $Al_2O_3$  нанобөлшектерінің пайыздық мөлшерінің артуы ODS-NiCoCrAlY жабындарының микроқаттылығын салыстырмалы түрде жоғарылататынын анықтаған [143]. Сонымен қатар, NiCoCrAlY+1 мас.% nano- $GeO_2$ +0,5 мас.% nano- $Al_2O_3$  ODS-NiCoCrAlY жабындарының барлық басқа түрлерімен салыстырғанда кеуектіліктің төмен пайызына ие екендігін және  $1000^\circ C$  температурада 500 сағат ұстаудан кейін тотығуға төзімділігінің 41% жақсарғанын атап көрсеткен.

Инконел 718 (XN45MBTЮБР) қорытпаның бетіне  $Al_2O_3$  ұнтағын түрлі қатынаспен (10%, 20%, 30%) жоғары жылдамдықты оттегі-отын (HVOF) тозаңдау әдісімен өндеу микроқаттылық пен кеуектілік  $Al_2O_3$  оксиді мөлшерінің жоғарылауымен артқан [144]. [145] жұмыста HVOF тозаңдау әдісімен  $Al_2O_3$  жабыны алынған, алынған жабынды эксперименттік зерттеу тозу мөлшері 80 мкм-ге дейін, ал үйкеліс коэффициентінің мәні 0,25-ке дейін төмендейтінін, ал қаттылық пен қалдық кернеулер сәйкесінше 470 HB және 20 МПа дейін артатынын атап көрсеткен.



Қорыта келгенде, плазмалық немесе ауа плазмалық (PS) HVOF тозаңдау әдістерімен алынған  $Al_2O_3$  оксиді негізіндегі жабындардың нәтижелеріне талдаулар жасалынды. Талдау көрсеткендей  $Al_2O_3$  оксиді басқада композиттік материалдармен қосылып қапталу кезінде жабынның физико-механикалық және трибологиялық қасиеттері жақсарғанымен, аталмыш технологиялардың  $Al_2O_3$  оксиді сияқты керамикалық жабындарды алуда өзіндік кемшіліктерінің бар екені байқалды, технологияларды қауіптілігі мен басқарудың күрделілігі және қымбаттығы, сонымен қатар алынған жабындардың кеуектілігі жоғары, қаттылығы төмен екені, қалыптасқан жабынның біртексіздігі, жабын бойында бағана тәрізді қуыстардың болатыны, осы қуыстардың әсерінде төсеніш материал коррозияға жиі ұшырайтындықтары анықталған. Ең негізгі кемшілік  $Al_2O_3$ -нің плазмалық немесе HVOF тозаңдаудан кейін негізінен  $\gamma-Al_2O_3$  фазаға өзгеретіні байқалды. Айта кету керек  $\gamma-Al_2O_3$  фаза  $\alpha-Al_2O_3$ -ге қарағанда төменірек қасиет көрсететіні әдебиеттік шолуларда нақты көрсетілген, осы проблемаларды ескере отырып, газотермиялық тозаңдау әдістерінің ішіндегі детонациялық тозаңдауды таңдап алдық, бұл технология жоғарыдағы басқа технологиялармен салыстырғанда біріншіден басқаруы қарапайым, әрі арзан, екіншіден алынған жабындардың кеуектілігі төмен, физикалық-механикалық қасиеттері айтарлықтай жоғары болуымен ерекшеленеді, сонымен бірге жабынның құрылымы біртекті, горизонтал бағытта орналасады әрі адгезиялық беріктігі жоғары, сонымен бірге оқпанды газға толтыру мөлшерін реттеу ыңғайлы, компьютермен басқарылады, сол арқылы қаптамақшы болған ұнтаққа температуралық әсер ете отырып, алынатын жабынның құрылым-фазалық өзгерісін реттеуге мүмкіндігі зор. Құралдың бір ғана кемшілігі көрсетілген, детонациялық жарылыс кезіндегі дыбыстың мөлшері 140 ДБ ден асады, бұл кедергінің алды алынған, дыбысты тосатын арнайы бөлмеге орналастырылған, осындай артықшылықтарын ескеріп, диссертациялық жұмыс тақырыбына негізделе отырып,  $Al_2O_3$  және басқада ұнтақтардың қатысуымен алынған керамикалық жабындардың қасиетінің артықшылықтары мен кемшіліктерін салыстыра қарап,  $Al_2O_3$  жабынын детонациялық тозаңдау құралын пайдаланып, тозаңдау параметрлерін өзгертіп,  $Al_2O_3$ -нің құрылым-фазалық күйіне әсер етіп, физико-механикалық және трибологиялық қасиеті жақсартылған градиентті жабын алуды мақсат ете отырып зерттеу жұмыстарын жасау дұрыс деген шешімге келдік. Сол себепті төменде детонация тозаңдау құралының жалпы жұмыс ерекшеліктерімен мүмкіндіктеріне қысқаша тоқталдық.

1.2.3  $Al_2O_3$  негізіндегі жабындарды алуда детонациялық тозаңдату (DS) әдісін қолану

Детонациялық тозаңдату - бұл газотермиялық тозаңдату әдістерінің бірі, жоғары тығыз жабындарды алу қажеттілігіне байланысты жасалған. Алайда, оқпан ұзындығы 450-1350 мм блғандықтан, жану үрдісі ұзақ жүреді. Үрдіс сипаттамасы еңбекте келтірілген [146].

Детонациялық тозаңдату газотермиялық тозаңдатуның басқа әдістерімен салыстырғанда негізгі материалмен ең үлкен тұтасу беріктігіне және жабынның ең кіші кеуектілігіне ие [147, 148]. Бұл ретте детонациялық жабындардың сапасы

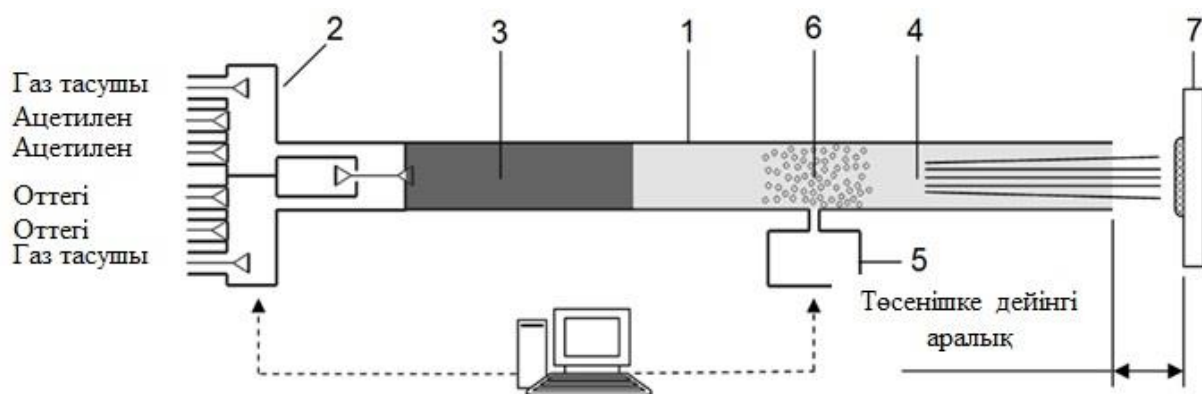
төсем материалы бетінің кедір-бұдырлығына және ұнтақтың химиялық құрамына, түйіршіктердің мөлшеріне, газдар мен қоспалардың қатынасына [149] байланысты болады. Бөлшектерді қалпына келтіру үшін тозуға төзімді жабындарды алу үшін  $Al_2O_3$ , WC - Co, NiCrBSi and  $Cr_3C_2$ -NiCr алюминий оксиді қолданылады. Детонациялық тозаңдауден кейін жабындардағы  $\alpha-Al_2O_3$  мөлшері ұнтақта ерімейтін немесе жартылай еритін бөлшектердің болуына байланысты. Сондықтан алюминий оксиді негізіндегі жабындардың құрылымдық-фазалық күйлері детонациялық тозаңдаудың технологиялық режиміне тәуелді болады [150,151].

Бұл әдістің ерекшелігі-тозаңданатын ұнтақ материалының бөлшектерін қыздыру үшін газ жарылысын пайдаланумен анықталатын процестің импульстік сипатында. Жылу энергиясының жоғары концентрациясының қуатты динамикалық арынмен үйлесуінің арқасында (ату жиілігі секундына 3-4), жарылыс детонация өнімдеріне кез келген ұнтақты материалды балқытуға дейін қыздыруға мүмкіндік береді (соққы кезіндегі бөлшектердің температурасы  $4000^{\circ}C$  жетеді), оның бөлшектерін рекордтық жылдамдық шамамен 1 км/с -ге дейін жеделдетеді. Екінші жағынан, өңделетін материалдың айтарлықтай қызуының тереңдігі мөлшермен он микроннан аспайды, ал интегралды термиялық әсер тозаңдатылған ұнтақтың жылулық әсерімен анықталады, бұл материалдағы жағымсыз құрылымдық өзгерістерді және бөлшектің артық деформациясын (шырмалар мен қораптар) болдырмауға мүмкіндік береді [152].

Детонациялық тозаңдаудан алынған жабындар жоғары беріктікке, қаттылыққа және тозуға төзімділікке ие [153]. [154, 155] зерттеу кумулятивті-детонациялық құрылғы саптамасының 1000 сағаттан астам жұмыс істеу қабілеттілігі бар екенін көрсетті. Сонымен қатар, [156] жұмыста көрсетілгендей, 0,1 - 0,2 МПа төмен қысымды бастапқы газдарды пайдалану басқару жүйесін тиісті арзан құрылғылармен жабдықтауға мүмкіндік береді, бұл олардың құнын төмендетеді және ең бастысы, жұмысты жүргізу қауіпсіздігін арттырады.

Жабындарды детонациялық тозаңдандыру әдісі- детонациялық газды тиімді қолдануының нәтижесі. Процесс  $C_2H_2/O_2$  қоспаның жарылыс энергиясын пайдалануға негізделген және жақсы адгезияға (жабысқақтыққа) ие түрлі ұнтақ материалдардан жабын алудың ерекше тәсілі ретінде белгілі [157, 158]. [159] жұмыста әр түрлі материалдардың детонациялық шашырауын зерттеу нәтижелеріне шолу жасалды.

Детонациялық тозаңдау процесі [157 б. 26] еңбектерде кешенді зерттелді. CCDS2000 схемалық көрінісі сурет 3 те көрсетілген.

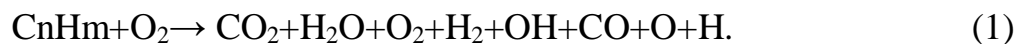


1 – детонациялық қондырғының діңі, 2 – прецизионды газ бөлгіш, 3 – жарылғыш қоспаның заряды, 4 - тасушы газ аймағы, 5 – ұнтақты дозатор, 6 – ұнтақ бұлтының аймағы, 7 – төсем.

Сурет 3 – CCDS2000 детонациялық тозаңдау құралының сұлбасы:

Отын көлемінің жануы 1 мс ішінде жүреді, бұл газ қоспасында детонациялық толқынның пайда болуын тудырады, оны тасымалдаушы газ саласындағы соққы толқынына айналып, детонация өнімдері 3500-4500 К дейін қызады, бұл ретте газ тасымалдаушы 1000-1500 К дейін қызады [158], процесс жиілігі – 10 Гц, өнімділігі – 5 кг/сағ. 3D манипуляторды қолданғанда, күрделі рельеф және үш өлшемді геометриясы бар жабынды бетке жағу мүмкіндігі бар.

Газ қоспасының жарылу процесі кезіндегі жану реакциясын келесі схемамен сипаттауға болады [158 б. 147]:

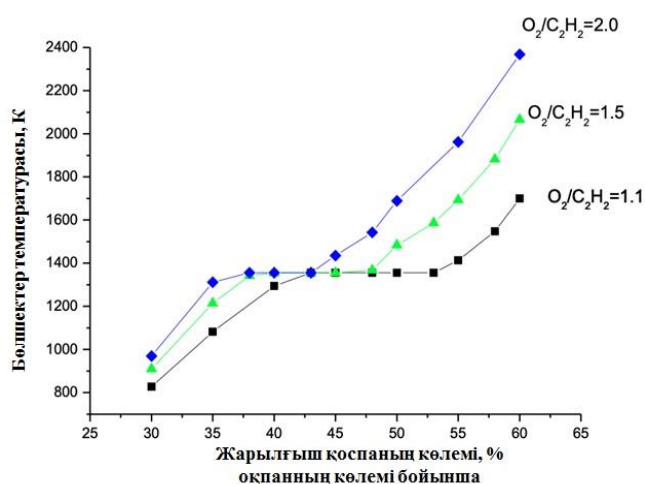


3 кестеде  $\text{C}_2\text{H}_2 + \text{O}_2$  қоспаларына арналған детонация өнімдерінің құрамы ұсынылған [160]. Детонация өнімдері оттегінің болуына байланысты өте жоғары тотығу белсенділігіне ие болуы мүмкін. Детонациялық режимінде  $\text{C}_2\text{H}_2 + \text{O}_2$  қоспаларын жағуда қоспада ацетилен мөлшері 50 % болған кезде детонация өнімдерінің ең жоғары температурасына қол жеткізіледі [158]. Детонациялық өнімдердің температурасы көрсетілген мәнге қатысты жарылғыш қоспадағы ацетилен мөлшерінің жоғарылауымен немесе төмендеуімен белгіленеді. Бөлшектердің температурасы тек детонация өнімдерінің температурасымен ғана емес, сонымен бірге олардың ыстық газдармен әрекеттесу уақытын анықтайтын бөлшектердің жылдамдығымен де анықталатынын ескеру қажет. Бөлшектердің жылдамдығы  $\text{C}_2\text{H}_2/\text{O}_2$  қатынасына да байланысты. Осылайша,  $\text{C}_2\text{H}_2/\text{O}_2=1,1$ -ден  $\text{C}_2\text{H}_2/\text{O}_2=2,5$ -ке өткенде, бөлшектердің жылдамдығының төмендеуі, жарылыс қоспасының тұрақты көлемімен олардың температурасының жоғарылауына әкелуі мүмкін. Тоzaңдау процесінің өзгермелі параметрлеріне  $\text{C}_2\text{H}_2/\text{O}_2$  қатынасы, детонациялық оқпанында жарылғыш қоспаның мөлшері, тозадау қашықтығы және тасымалдаушы газды таңдау кіреді. 4-Суретте 40 микрондық мыс бөлшектерінің температурасы  $\text{O}_2/\text{C}_2\text{H}_2$  әр түрлі арақатынаста жарылыс қоспасы

мөлшерінің артуымен қалай өзгертіні көрсетілген [161]. Қисықтардың көлденең бөлігі мыстың балку температурасына сәйкес келеді. Жарылғыш қоспада оттегінің жоғарылығы бөлшектердің жоғары температураға дейін қыздырылуына әкеледі.

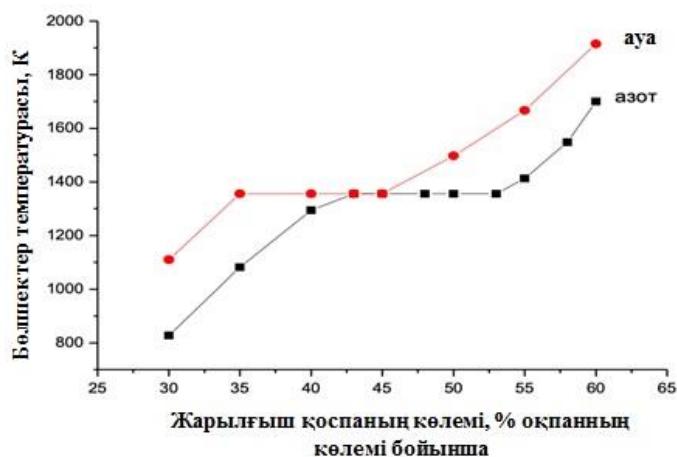
Кесте 3 – Әртүрлі стехиометриядағы  $C_2H_2+O_2$  қоспаларына арналған детонация өнімдерінің құрамы

| Қосылыс | Қосылыстың мольдік үлесі |                  |                  |                  |
|---------|--------------------------|------------------|------------------|------------------|
|         | $C_2H_2/O_2=1.1$         | $C_2H_2/O_2=1.5$ | $C_2H_2/O_2=2.0$ | $C_2H_2/O_2=2.5$ |
| $O$     | 0.009                    | 0.064            | 0.112            | 0.129            |
| $O_2$   | -                        | 0.015            | 0.065            | 0.117            |
| $H$     | 0.215                    | 0.160            | 0.102            | 0.074            |
| $H_2$   | 0.165                    | 0.094            | 0.053            | 0.036            |
| $OH$    | 0.013                    | 0.070            | 0.106            | 0.115            |
| $H_2O$  | 0.014                    | 0.060            | 0.083            | 0.089            |
| $CO$    | 0.579                    | 0.503            | 0.411            | 0.347            |
| $CO_2$  | 0.005                    | 0.033            | 0.069            | 0.092            |



Сурет 4 – Азотты тасымалдаушы газ ретінде пайдалану кезінде  $C_2H_2/O_2$  мольлық коэффициенттерінің детонациялық оқпанындағы жарылғыш қоспаның көлеміне байланысты салыстырмалы графигі [161]

5 – Суретте  $C_2H_2/O_2=1,1$  кезінде азот пен ауаны тасымалдаушы газ ретінде пайдалану кезінде жарылғыш қоспаның көлемінің функциясы ретінде детонациялық оқпаннан шығатын диаметрі 40 мкм болатын мыс бөлшектерінің температурасы мен жылдамдығына тәуелділігі көрсетілген [161].



Сурет 5 – Азот пен ауаны тасымалдаушы газ ретінде қолданған кезде жарылғыш қоспасының көлеміне байланысты салыстырмалы графигі  $C_2H_2/O_2=1,1$  [161]

Тасымалдаушы газдың бөлшектердің жылдамдығына әсер етуі аз болса да, жарылыс қоспасының бірдей көлемдері үшін азоттың орнына тасымалдаушы газ ретінде ауаны қолдану арқылы жоғары температураға қол жеткізіледі. Бұл атмосфералық оттегі отынның тотығуына қатысуына байланысты. Тозандану  $C_2H_2/O_2=2,5$  болғанда, бұл әсер елеусіз болады. Әр түрлі материалдар бөлшектерінің жылдамдықтарының есептік мәндері CCDS-камераның жұмысын тиімді пайдаланатын диагностикалық кешен көмегімен жүргізген, CCDS қондырғысының импульстерімен синхрондалған өлшеулермен жақсы сәйкеседі [158, б.148; 162].

### 1.3 $Al_2O_3$ негізіндегі жабындардың құрылымдық қасиеттерінің ерекшеліктері және оларды жақсарту жолдары

$Al_2O_3$  негізіндегі детонациялық жабындардың қасиеттері жабынды бөлшектерінің төсенішпен және бір-бірімен динамикалық және жылулық өзара әрекеттесуімен, жабынды бөлшектерінің материалдарында және төсеніште суыту кезінде химиялық түрленумен және фазалық өзара әрекеттесуімен анықталады. Олардың әрқайсысының жүйенің қозғалысына әсері-негіз тозанданатын бөлшектердің жылдамдығы мен температурасы, төсеніштің жай-күйі, материалдардың жылуфизикалық және физикалық-механикалық қасиеттері және т. б. сияқты көптеген факторларға байланысты [163].

Жабындарды қалыптастыру процесіндегі негізгі міндеттер негізімен (адгезия) жабынның бөлшектері арасындағы жоғары жабысу мен берік байланыстың (когезия) пайда болуын қамтамасыз ету болып табылады. Жабысу беріктігі (адгезия) көп жағдайда оның қолданылу аймағын және пайдалану сипаттамаларын анықтайтын жабынның негізгі сипаттамасы болып табылады [164, 165]. Адгезия механизмі әдетте жабынды және төсеніш материалдарының жергілікті химиялық және механикалық өзара әрекеттесуімен, Ван-дер-Ваальс күшінің, электростатикалық және басқалардың әсерімен байланыстырады [166, 167]. Адгезия шамасын анықтайтын маңызды фактор-тозанданатын

бөлшектердің жылдамдығы және олардың температурасы. Жабысу (бірігу) жоғары беріктігіне қол жеткізу үшін бөлшектердің жылдамдығы мен температурасының мәні және олардың балқу дәрежесі олардың деформациясы мен соғылу кезінде ағуын қамтамасыз етуі тиіс. [168, 169]. Негізгі қабаттарында пайда болатын динамикалық деформация толқындары бөлшектердің соққысы кезінде оның бетін қарқынды тазартуға, бөлшектердің деформациясына ықпал етеді. Бұл жабысу беріктігін және жабындарының тығыздығын айтарлықтай арттыруға әкеледі. Детонациялық әдіс кезінде бөлшектердің жылдамдығы өте жоғары (500 м/с жоғары). Сондықтан детонациялық жабындар басқа газотермиялық жабындармен салыстырғанда 100-200 МПа (метал ұнтақтары үшін) жеткен адгезияның жоғары мағынасына ие. Сонымен қатар, бұл жұмыс барысында бөлшектердің ең жоғарғы рұқсат етілген соғу жылдамдығы бойынша шектеу бар. Бұл байланыс аймағында материалдың үзілу беріктігінің динамикалық шегінен асатын кернеудің пайда болуымен, сондай-ақ төсеніштің сынған бұзылу қауіпімен байланысты. Жылдамдықтың шектелуі бөлшектер материалдарының қасиеттеріне және бөлшектің үстіңгі қабатының ерекшеліктеріне және олардың жағдайына байланысты [170].

Жабысу беріктігін арттыру үшін төсеніштің беті маңызды рөл атқарады (әдетте, бұл құм-ағынды өңдеу). Беттің кедір-бұдырлығы жабысу беріктігін максимумға дейін жоғарылатады [164, б. 73]. Бұл ретте кедір-бұдырлықтың жабысу беріктігіне әсері тозаңданатын бөлшектердің температурасына байланысты. Айта кету керек, детонациялық тозаңдау кезінде төсеніштің және жабын материалдарының әртүрлі жылуфизикалық қасиеттеріне, жабындардағы фазалық өзгерулерге және басқа факторларға байланысты төсеніш-жабын жүйесінде қалдық кернеулер пайда болады, бұл адгезия беріктігінің төмендеуіне әкеледі [171]. Қалдық кернеулер жабынның қалыңдығын арттырумен өседі. Сондықтан әр түрлі технологиялық әдістер есебінен осы кернеуді төмендету жабынның беріктігін арттырудың тиімді тәсілі болып табылады. Қалдық кернеулердің мәндерін азайтуға негізді қыздыру, кейіннен термомеханикалық өңдеу, пластификациялайтын қоспаларды тозаңдататын материалға енгізу есебінен қол жеткізуге болады [172]. Материалдың бір құрамын тозаңдату кезінде тозаңдату процесінің технологиялық параметрлеріне байланысты әртүрлі қаттылығы бар жабынды алуға болады. Бұл бөлшектер мен төсеніштердің температурасына, олардың салқындату жылдамдығына, бөлшектердің өлшеміне байланысты, жабын материал түйіршіктерінің фазалық құрамы мен құрылымы, қуыстар саны мен олардың шамасы, әртүрлі қосылыстардың қосылуы және т. б. өзгеруімен түсіндіріледі [165, б.521]. Шағын және орта жүктеменің әсерінен жұмыс істейтін үйкеліс тораптарында жабын материалының қаттылығына байланысты желілік тозу қамтамасыз етіледі. Бірақ қазіргі заманғы мұнай-газ өндіру жабдықтары мен кеме, машина жасау үшін тән үлестік жүктеме деңгейінің өсуімен, тозу шамасы қаттылықтан басқа, бірқатар факторларға, атап айтқанда жабын материалының жарықшаққа (жарылуға) төзімділігіне байланысты болады [173].

$Al_2O_3$  негізіндегі жабындарды детонациялық әдіспен қалыптастыру заңдылықтарын анықтау үшін алюминий оксиді ұнтағын тозаңдау кезінде

болатын физикалық-механикалық процестердің қатарын талдау қажет. Детонациялық тозаңдау газ қоспаларының жану өнімдерінің электромагниттік үдеуіне негізделген және жоғары жылдамдықты ( $v = 1200-10000$  м/с), жоғары температуралы ( $2 \cdot 10^3$  К) детонациялық толқынды алумен сипатталады [174-179]. Детонациялық ағынға түсіп, ұнтақ бөлшектері қызады және жылдамдайды. Электр тогының детонациялық ағыны арқылы өткізу екі фазалы газ ағынына энергияның қосымша ағуына әкеледі, бұл жоғары жылдамдықты тозаңдау жағдайында материалды ерітудің жеткілікті деңгейін қамтамасыз етеді [177, б. 321].

[178, б. 15] жұмыс кезінде анықталған жабындар сипаттамаларының жүктеме тереңдігіне тәуелділігі ірі дисперсті ұнтақ үшін (20 мкм) шекті тереңдігі бар екенін көрсетеді, одан асып кеткен кезде балқу дәрежесі жоғарламайды. Бұл, шамасы, оқпандағы температура  $T_{\text{балқу}}$  температурасынан жоғары болатын уақыты үлкен емес және оқпандағы қозғалыс кезінде ұшу тоқтатылады. Тез балқитын материалдарды тозаңдатқанда, оқпан диаметрінің ұлғаюында пайдалану коэффициенті едәуір азаяды, бұл детонация өнімдерінің температурасының мәнінен жоғары және булану процестерінің жылдам болуы әсерінен [179, б. 24]. Тозаңданатын ұнтақтың көп мөлшерінің балқуын қамтамасыз ету үшін қажетті диаметрден артық ұлғаюы жабынның қасиетін төмендетуге әкеледі. Жабынның тозаңдануы кезінде балқытылған бөлшектер суық төсенішке соғылады, сондықтан олардың ағуы мен деформациясы қатаюмен қоса жүреді. Жабындарды қалыптастыру барысында инерция күштері мен газодинамикалық күштердің әсерінен тозаңданатын материал плазмалық ағысқа енгізіледі, ағынның орын ауыстыруы төсенішке тік бұрышпен өтеді, тозаңданатын материал толығымен балқытылады, бұл жағдайда үстіңгі бетінде көлденең қимада қалыңдығы да қалыпты таралу заңына бағынатын жабынның жеке жолағы пайда болады [180]. Қалыпты жағдайда, ұнтақты детонациялық ағынға беру кезінде жылу, жылдамдық, энтальпиялық қайта бөлу жүреді, ағынның концентрациялық өрісі өзгереді. Бөлшектер массасының біркелкі бөлінбеуі және детонациялық толқынның температуралық өрісі радиалды және осьтік бағытта біркелкі емес болып келеді. Бұл жағдайда ағында бір мезгілде қатты және балқытылған күйдегі бөлшектер бар. [181] жұмыста, ұнтақты жоғары температуралық толық еріту, әсіресе ұсақ фракцияларға тән ( $d \sim 20$  мкм) жағымсыз болып табылады, себебі бөлшектер жылдамдығының айтарлықтай төмендеуін тудырады. Бұл жағдайда, [182] жұмыста көрсетілгендей, төсеніштің термиялық деформациясының шамасы азаяды, бұл өз кезегінде, қалыптасатын жабындардың адгезиясына және кеуектілігіне теріс әсер етеді.

[183, 184] зерттеу авторлары ұнтақтың ұсақ фракциясын толық алып тастаудың дұрыс еместігін айтқан, өйткені ол аз кеуектілігі және төмен жылу өткізгіштікке ие сапалы тығыз жабынның қалыптасуын қамтамасыз етеді.  $T > 10^4$  К кезінде жылуды тасымалдау негізінен электрондар мен иондардың есебінен жүзеге асырылатыны дәлелденді, сондықтан, керамикалық материалдар ( $\lambda(\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3) = 3,255$  Дж/м·с·К,  $T_{\text{балқу}} = 2323$  К [185], өйткені металдармен салыстырғанда жергілікті жылу ағындарын таратуда қатты айырмашылық байқалады, бұл керамика бөлшектерінің градиенттік қызуына

әкеп соқтырады, ол бір мезгілде біртіндеп берілетін керамика бөлшектерінің градиенттік қызуына алып келеді. Материалдың булануы [186]. Плазма ағынымен балқытылған бөлшектердің ағуы механикалық бұзылулар процестерімен, балқумен немесе буланумен байланысты тоздандатын материалдың бастапқы түрінің өзгеруіне әкеледі.

Детонациялық тоздандудың жеке циклі кезінде ~3-15 мкм жабынның қорғаныш қабатын қалыптастыра отырып, детонациялық толқынның төсенішінің бетін термомеханикалық активациялау жүргізіледі [187]. Көрсетілген қабат төсенішке тығыз жабысумен сипатталады. [188] жұмыстың авторлары төсенішпен жабынды жақсы жабысу (бірігу) үшін материалдың жоғары жылдамдықты тұндыру процесінде ұнтақ бөлшектерінің температурасы төсеніштің балқу температурасынан едәуір асып түсуі қажет екенін атап өтті. [189] сәйкес, бөлшектердің төсенішпен термиялық өзара әрекеттесуі байланыс аймағында материалдардың температурасын реттеумен жүреді. Егер байланыс температурасы ( $T_k$ ) төсеніштің балқу температурасынан ( $T_{балқу}$ ) артық болса, онда сұйық бөлшектердің кату процесі негізгі материалдың балқытуымен бір мезгілде жүреді. [190] жұмыста көрсетілгендей төсеніш материалына ұқсас материал мен жабын материалын араластыру арқылы бірге балқыту жүреді, бұл дәнекерлеу процесінде материалдардың жабысуына ұқсас жабындардың жоғары адгезиясының пайда болуын қамтамасыз етеді.

[190, б. 268] жұмыстың авторымен 12X18H9T болаттан жасалған төсеніш бетімен  $Al_2O_3$  ұнтағының балқытылған бөлшектерінің өзара әрекеттесуінің байланыс температурасын бағалау үшін қолданылды, өйткені тоздандату технологиясының өзі детонациялық ағынның құрамында ұнтақ бөлшектерінің қызған күйде болу мүмкіндігін жоққа шығармайды, бұл әдеттегідей өзара әрекеттесіп байланысуы үшін қосымша энергия енгізуді қамтамасыз етеді [86, б. 59].

[191] жұмыста көрсетілгендей, шекарадағы жабынның химиялық құрамы жабын және төсеніш сияқты элементтерден тұрады. Жабынның шекаралық қабатының басты ерекшелігі бұл қабаттың жартылай балқытылған жабын материал және төсеніштің балқытылған бөліктерінен құралады. Бұл жағдайда сұйық фаза қабаттың бүтіндігін, сондай-ақ төсеніштің жоғарғы адгезиясын қамтамасыз етеді, ал дисперсиялық ортаның сандық арақатынасының өзгеруі жабындардың физикалық-химиялық қасиеттерін кең ауқымда реттеуге мүмкіндік береді [191, б. 824]. [192] жұмыс авторлары плазмалық тозданду процесінде  $Al_2O_3$  ұнтағының коррозияға төзімді болаттарымен химиялық байланыстың пайда болу мүмкіндігін зерттеді. Бұл материалдардың өзара әрекеттесуі кезінде  $3Me + Al_2O_3 \rightarrow 3MeO + 2Al$  типті тотығу-тотықсыздану реакциясынан өтуі мүмкін екендігі анықталды, мұнда тотықтырғыш металдар ретінде болаттың құрамдас элементтері (Cr, Fe және Ni) қолданылады. Аралық оксидтің қалыптасқан қабаты өте аз қалыңдыққа ие және төсенішке жабынның адгезиясының артуына ықпал етеді. [193] жұмыс барысында авторлар импульсті плазма ағынымен қаптау кезінде тереңдігі бойынша біртекті емес фазалық құрамы бар қорғаныс қабаты қалыптасатынын көрсетті. Бұл зерттеуде жабынның үстіңгі жағында  $\alpha-Al_2O_3$  (~ 8 көлем %),  $\gamma-Al_2O_3$  және аморфты фаза



болатындығы анықталынды. Жабынның тереңдігінде метақалыпты  $\theta$  – фазасы пайда болады, оның құрамы жабынның бетінен төсенішке қарай жылжуына қарай артады. "Жабын – төсеніш" бөлімінің шекарасындағы фазалық құрамды зерттеу бастапқы материалда импульстік плазманың жоғары жылдамдықты ағындарының көмегімен ұнтақ тұнған кезде  $Al_2O_3$  жоғары температуралы химиялық байланыстың үзілуі мүмкін екендігін көрсетті, кейіннен темірдің алюминиймен интерметаллдық қосылысы пайда болады. Нәтижесінде орташа көлемі 0.02 ден 0.03 мкм-ге дейінгі  $AlFe$  кристалдарынан тұратын жұқа өтпелі аймақ пайда болады. Осылайша, ұнтақты жабындарды тұндырудың детонациялық әдісі төсеніш бетінің қарқынды белсендірілуін тудырады, ол өз кезегінде әр текті материалдар арасында химиялық қосылыстардың пайда болуына әкеледі. Бастапқы материалда беттің физика-механикалық қасиеттерін анықтайтын бірқатар маңызды фазалық түрленулер орын алады. Алайда метақалыпты фазалардың құрлымы төмен кеуекті, тозуға және коррозияға төзімді жабындардың қалыптасуына кедергі келтіреді [194, 195].

Газотермиялық әдіспен алынған жабындар, олардың тозаңдану әдісіне қарамастан, соққының, қатты деформацияның және тозаңданатын бөлшектердің жоғары жылдамдықтағы кристалдануы нәтижесінде болатын химиялық өзара байланысулары болған [186, б. 411; 196], беттермен өзара жақсы байланысқан жылдам деформацияланған тозаңданған бөлшектерден тұратын қабатты құрылымға ие [197, 198].

Қабаттар және бөлшектер арасындағы шекаралардың пайда болу шарттары атмосферада болу ұзақтығымен анықталады. Тоzaңданатын бұйымның өлшемі мен конфигурациясына, тозаңдатқыштың жылжу траекториясына байланысты қабаттарды салу сәттері арасында "үзіліс" бір секундтан он секундқа жетуі мүмкін. Жабын бетіндегі қабаттардың тозаңдануы кезеңінде газдың адсорбциясы, тозаңданатын материалдың шаң тәріздес фракциялары мен оның тотығуы және шөгуі болады [180, б. 83]. [199] жұмыста деформацияланатын бөлшектердің көптігін біртіндеп жағу арқылы  $Al_2O_3$  негізіндегі жабындарды қалыптастыру әрдайым микроқуыстардың пайда болуына әкеледі, бірінші кезекте бөлшектер түйіспелерінде (қоспаларында). Жабындар атмосферада қалыптасады, сондықтан микроқуыстар газбен толтырылады, бұл шекараның қасиеттерін нашарлатуы мүмкін [180, б. 86]. Микроқуыстардың пайда болуы тозаңданатын ұнтақтың кристалдану процесімен [200], оның төсеніш материалымен байланысуымен [201] немесе жоғары температура мен қысым әсерінен төсеніштің үстіңгі қабатын жарумен байланысты болуы мүмкін [180, б. 88].

[202] жұмыста газотермикалық жабындардың кеуектілігі көлемі бойынша әр түрлі, тереңдігі мен ені бойынша біркелкі таралуы мүмкін екендігі жазылған. Сонымен қатар, кеуектілік беттің механикалық қасиеттеріне түрлі деңгейде әсер ететіні айтылған. Қуыстардың үлкейген өлшемінің пайда болуы жабындардың қаттылығы мен тозуға төзімділіктің өзгеруіне кері әсер етеді [185, б. 1243]. Алайда, [203] жұмыстың авторы жабық кеуектіктің адгезионды және когезионды беріктікке жағымды әсерін және аралық кеуектіктің жабынмен төсенішпен жабысу беріктігіне теріс әсерін атап өтті. [204] жұмыстың авторы

оксидтік керамикадан жасалған газотермиялық жабындар барынша жоғары тозуға төзімділікке ие екендігі және 5-15% кеуектілігі бар жабынды сұйықта үйкелгенде жаңа бөлшектен жоғары тозуға төзімді екендігін анықтады, алайда бұл жабындар құрғақ үйкелгенде жеткілікті тозуға төзімділікпен қамтамасыз етпейді, өйткені жабын материалының жабысу беріктігі алынатын жабындардың жоғары кеуектігінен төмен болып қала беретіндігі жайлы айтылған.

Кеуектілікті жою үшін бірнеше түрлі әдістер қолданылады. Сонымен, [205] жұмыс авторлары бір мезгілде ірі және ұсақ фракциялы ұнтақтарды пайдаланды; [206] жұмыс авторлары тозандатылатын ұнтақтардың құрамына негізбен салыстырғанда қиын балқитын заттардан қосымша байланыстырушы компоненттерді енгізуді ұсынады; [207] жұмыстарда кеуектікті жою үшін бір материалдың бірнеше қабаттарын жағу әдісін пайдаланды; [208] жұмыс авторы, шөгетін ұнтақтың температурасы мен жылдамдығын бір мезгілде арттыру арқылы кеуектілікті төмендетуге қол жеткізді; ал [209] жұмыста кейіннен үстіңгі қабатқа термиялық өңдеу жүргізілді. [210] жұмыс кезінде плазмалық ағыстың температурасы мен жылдамдығы балқытылған бөлшектің төсенішпен жабысуына негізгі рөл атқаратыны және болашақ жабындылардың кеуектігін кейіннен жоюда атап көрсетілген.

[211] жұмыстың авторы ұнтақтың тозандатқыш бөлшектерінің энергетикалық сипаттамаларының өлшемі бойынша жабындарды детонациялық тозандаудың оңтайлы технологиялық шарттарын анықтау әдісін ұсынды. Жұмыста сапалы газ жалынымен жабындыны алу шарттарының бірі өнім бетінде тозанданатын материал бөлшектерінің қажетті энергия деңгейін қамтамасыз ету болып табылатыны көрсетілді. Бөлшектердің энергетикалық жай-күйі энергия-жылу, қыздыру температурасымен сипатталатын және кинетикалық қосындысымен анықталады.

Керамикалық жабынды жылулық өңдеу оның құрылымын өзгертуге, микроқуыстарды жоюға және төсеніш пен жабынның арасында біркелкі бірігуді пайда қылу мақсатында қолданылады. Жоғары температураның әсерінің нәтижесінде  $Al_2O_3$  оксидінен жасалған керамикалық жабындарда бірқатар фазалық түрленулер орын алуы мүмкін, олардың  $Al_2O_3$  оксидінен  $\alpha$ -фазаның түзілуі екені белгілі [212].

[183, б. 116] жұмыс авторлары детонациялық және плазмалық-детонациялық жабындарды термиялық өңдеу жағдайлары үшін 773-тен 1673 К-ге дейінгі температуралық диапазонда 100 К интервал аралығында күйдірумен оксидті-алюминий керамикадағы фазалық айнарудың кезектілігі мен температуралық диапазонын эксперименталды түрде анықтады. Жұмыста  $Al_2O_3$  жабындары бастапқыда  $\gamma$  -,  $\alpha$  - және рентгендік аморфты фазалардан тұратындығы,  $\gamma$  – фазасы 1073 К-ге дейін тұрақты болып табылатыны көрсетілген. Күйдіру температурасының жоғарылауы  $\gamma$ -фазадан  $Al_2O_3$  оның төменгі температуралы модификациясының  $\gamma-Al(OH)_3$  бөлінуіне және  $Al_2O_3$   $\delta$ -фазасының пайда болуына алып келді. Келесі температураның 1173 К-ге дейін көтерілуі осы фазаларға сәйкес келетін рефлекстердің рентгенограммаларындағы жағдайдың шамалы өзгеруі кезінде  $\gamma$  - және  $\delta$ -

фазалар арасындағы қарқындылықтың қайта бөлінуімен қатар жүрді. 1273 К температурасында  $\delta \rightarrow \theta$  типті фазалық өзгерістердің полиморфты механизмі белсендірілді және  $Al_2O_3$ -дың  $\alpha$ -фазасының көлемдік құрамының жоғарылауы тіркелді. Температура 1373 тен 1473 К-ге дейінгі диапазонда ұнтақты жабынның құрамында  $\alpha-Al_2O_3$ -дың қарқынды қалпына келуі  $\gamma$ -және  $\theta$ -фазалар құрамының бір мезгілде азаюы кезінде болды. Осы температуралық интервалда 1473 К кезінде іс жүзінде жоғалып кеткен аморфты заттың кристалдануы басталды.  $Al_2O_3$   $\alpha$ -фазасының толық қалпына келуі  $T = 1573$  К кезінде аяқталды.

[213] жұмыста 1223-1473 К температура диапазонында алюминий оксидінен жасалған жабынды термиялық күйдіру  $\gamma-Al_2O_3 \rightarrow \alpha-Al_2O_3$  типті қайтымсыз фазалық алмасулармен зат көлемінің  $\Delta V/V = -14,3\%$  азаюымен қатар жүреді, бұл өз кезегінде материалдың жарылуына теріс әсерін тудырады. [214] жұмыстың авторы  $\alpha-Al_2O_3$  тепе-тең фазасының қалыптасуының алдында ұнтақ материалының бастапқы полидисперстігіне және төмен температураға байланысты елеулі көлемді өзгерістерсіз түзілетін бірқатар аралық қосылыстар түзіледі деп тұжырымдайды. Алайда [213] жұмыста, авторлар алюминий оксидінен жасалған жабында болатын полиморфтық айналулар қатары айтарлықтай көлемді өзгерістерге алып келеді, ол ұнтақ жабындарының 250 мкм қалыңдығы кезінде олардың жарылуы мен негізден қабаттануын туындатады деп тұжырымдады. Осы жұмыста жабынды жағу үшін қолданылатын ұнтақ орташа мөлшері (размері) 50 мкм-ден асатын ірі фракция болғанын және осы жабынды жағу кезінде жоғары кеуектілік пен нашар жабын қабаты түзілгенін атап өткен. Жоғары температуралы күйдіру процесінің  $Al_2O_3$  ұнтағынан детонациялық жабындардың құрылымдық-фазалық жағдайына әсерін талдау, өңдеудің осы түрі негізінде  $\alpha-Al_2O_3$  фазасының құрамын арттыру жолымен жабындардың механикалық сипаттамаларын арттыруға мүмкіндік береді.

$TiAl$ ,  $Ni_3Al$ ,  $Fe_3Al$ ,  $NbAl$  және т.б. сияқты интерметалдық қосылыстар керамиканың тиімді күшейткіштері болып табылады. Пластикалық деформация механизмі мен бірлескен жарықтардың пайда болу механизмінен басқа  $Al_2O_3$ -нің температуралық сызықтық кеңеюінің коэффициентінің (ТСКК) айтарлықтай өзгеруіне байланысты қалдық кернеулер механизмі де қосылады.  $Al_2O_3$  композициялық керамикалық материалдағы жарықтардың бетін қосатын  $Nb-Al$  пластикалық бөлшегі байқалған [215]. Сондай-ақ, алюмин оксидті матрицасы бар барлық композиттерден ең жоғары қаттылығына ие керамикалық композиттер әзірленді. Металдар үшін тиімді механизм-пластикалық деформация-керамикада икемділік болмауынан жұмыс істемейді. Морт сынғыш материалдар үшін ең көп таралған механизм-жарықтарды қосу және бейнелеу. Басқа механизмдер материалдың қасиеттері мен оны дайындау технологиясына байланысты әрекет ете алады.  $Al_2O_3$  керамика үшін ең көп таралған екінші фазалар –  $SiC$ ,  $TiC$ ,  $ZrO_2$  және т.б. [216].  $Al_2O_3$ -нің матрицасына алюминий оксидінің нанобөлшектерін енгізу [217, 218] сонымен қатар нанобөлшектер мен жүйенің ірі бөлшектерінің арасындағы жылу қасиеттерінің айырмашылығынан туындайтын қысу кернеулерінің арқасында керамиканың беріктігі мен соққылық тұтқырлығын арттырады. Тек нанобөлшемді  $Al_2O_3$  ұнтағын пайдалану беріктігін

айтарлықтай арттырады, бірақ соққы тұтқырлығы шамалы артады. Бұл нанобөлшектер дәндердің мықты шекаралары бар ұсақ құрылымды құрайды, бұл керамиканың беріктігін арттырады; ал соққы тұтқырлығы нанобөлшектерде жоқ жоғары аспектілік қатынасы бар ірі дәндер немесе дәндер есебінен артады. Алайда, егер алюминий оксидінің нанобөлшектері түрлендіргіш қоспа ретінде енгізілсе, олар материалдың соққы тұтқырлығын арттыра алады.

Цирконий оксиді ( $ZrO_2$ ) тетрагоналды фазасының моноклинге айналу қабілетінің арқасында иілу кезіндегі беріктігі мен соққы тұтқырлығы үшін рекордтық жоғары. Трансформациялық нығайтудың ашылуымен  $Al_2O_3-ZrO_2$  жүйесінің керамикалық материалдарын және оларды алу тәсілдерін зерттеудің үлкен саны пайда болды. Трансформациялық беріктендіру дәрежесі түрлендіруге қабілетті материалдың санына байланысты. Цирконий оксиді толықтай тұрақтанатын болса, онда фазалық алмасу қабілеті жоғалады және қоспада  $ZrO_2$  болуына қарамастан, беріктендіру механизмі белсендірілмейді. Жартылай тұрақтандырылған цирконий диоксиді иілу кезінде беріктігі жоғары керамикалық жабындарды алу үшін қолданылады [219-221]. осындай жабындар орташа температурада жұмыс жасайтын, жоғары беріктікке әрі тозуға төзімді керамикалық жабынды алу үшін өнеркәсіпте кең қолданыс табады. Олардың негізінде жоғары температураларда жұмыс істеу үшін жоғары тиелген бұйымдарды жасауға талпыныстар бар, атап айтқанда, газ турбинының дискісын осындай материал негізінде жасау жұмыстарын атап өтуге болады [222]. Ұқсас материалдардың термиялық кеңею коэффициентінің салыстырмалы түрдегі жоғары 5 мәндерін атап өту керек:  $\alpha = 8 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ , бұл олардың термоциклдік жүктемелерге тұрақтылығын шектейді. Сонымен бірге, 20%-дан аз (көлем) Муллит негізінде жасалған ұқсас материалдар  $1350 \text{ }^\circ\text{C}$ -қа дейінгі температурада ұзақ уақыт тұрақтылықты сақтауға қабілетті және термиялық кеңею коэффициенті  $4,5 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$  аспайды. Сонымен бірге олардың күші астық мөлшерінің азаюымен, ал температураның тұрақтылығымен - түйіршік мөлшерінің ұлғаюымен артады. «Муллит - цирконий оксиді» материалдарының беріктігі максимум -  $1250-1350 \text{ }^\circ\text{C}$ . Мұндай материалдардың жоғары беріктігі 400-ден ( $20 \text{ }^\circ\text{C}$ -тан) 600 МПа-ға дейін ( $1300 \text{ }^\circ\text{C}$  -та), ал жоғары ресурстық нұсқалары 140-тан ( $20 \text{ }^\circ\text{C}$ -тан) 170 МПа-ға дейін ( $1350 \text{ }^\circ\text{C}$  -тан) болуы мүмкін [223, 224].

$Al_2O_3-ZrO_2$  және  $Al_2O_3-ZrO_2-Y_2O_3$  эвтектикалық құрамдардың керамикасы кеңінен қолдануға ие болды, өзара инертті фазалардың бөлу шекарасындағы жарықтың тежелу әсері есебінен нығайтылады. Алайда,  $Al_2O_3-ZrO_2$  негізіндегі эвтектикалық құрылымдардың ерекшелігі оңтайлы технологиялық параметрлерден немесе пайдалану факторларының әсерінен ауытқу салдарынан материалдың құрылымындағы шамалы өзгерістермен байланысты. Алюминий керамикасының иілу беріктігі мен қаттылығын арттыру мәселесінің тағы бір шешімі - ауыспалы қабаттарда әр түрлі композициялардан тұратын қабатты құрылымдар жасау. Реттелгеннен кейін қалдық кернеулер құрылымның ішінде серпімді модуль мен жылу қабатының жылу коэффициентінің айырмашылығынан туындайды, бұл макро деңгейінде тұтқырлық пен беріктіктің артуына әкеледі [225-227].

[228] жұмыста детонациялық жабындарды қалыптастыру негіздемесі ұсынылған. Динамикалық процес бойынша жабындардың пайда болуы шекаралық бетте энергияның тез әсер етуі кезінде жүреді, кейбір жағдайда тозандатылған материалдардың диффузиялық коэффициенттері тозандатылатын бөлшектердің тез деформациясы есебінен біршама артады. CCDS-2000 құралында тозандандыру параметрлерін ыңғайлы өзгерту мүмкіндігі, өзара химиялық әрекеттесудің кең спектрін және материалдар қатарының тозандату параметрлерінің өзгеруіне сезімталдығын анықтауға мүмкіндік береді. Тозандау  $C_2H_2/O_2 < 1$  қатынасында болуы мүмкін. Бұл аталған жағдайда детонациялық жарылыстың өнімдері қалпына келтіруші болады [229, 230].

Химиялық түрленулердің түрлі дәрежесі тозандатылған ұнтақтың меншікті бетіне, сонымен бірге бөлшектердің балку температурасы мен детонациялық толқын формасында ұшу жылдамдығына байланысты болады. Белгілі бір температураға жеткен кезде бөлшектердің жеке фазалары арасында өзара химиялық алмасулар орын алуы мүмкін. Химиялық реакцияның тез жүруі және төсенішке келіп жабысуы кезінде бөлшектердің тез салқындауы әсерінен пайда болған фазалардың кристалдық құрылымы тұрғысынан тұрақты болады. Дозатор арқылы оқпанға құйылған ұнтақтың массасы әдетте газдың массасынан аз болады. Детонациялық тозандату кезінде алғашқы ұнтақты қамтитын химиялық процестер үшін газ қоспаларының артық мөлшерін ескеру қажет. [231] жұмыста көрсетілгендей, Al-Si қорытпаларын жоғары жылдамдықты газ жалынмен тозандау кезінде жабындарда пайда болған кремний бөлшектері материалдың еруіне және оның тез сууына байланысты төсенішке түсетіндіктен бастапқы ұнтақ құрамындағы кремний бөлшектерімен салыстырғанда аз болады. Балқытылған бөлшектерден түзілген материалдың микроқұрылымының эволюциясы дисперсия дәрежесіне байланысты болады. Ерітілген бөлшектердің жылдамдығының жоғарылауымен, ол төсенішке келіп түседі, дисперсия дәрежесі жоғарылайды. азғана балқытылған түйіршіктер жылдам салқындатылады, сәйкесінше кристалдану кезінде оларда ұсақ түйіршіктер пайда болады. Нанокұрылымды элементтері бар жабындарды құрудың тағы бір мүмкіндігі бастапқы ұнтақтардың нанокұрылымының сақталуы болып табылады [232]. Жабындардың нанокұрылымдық элементтері нанокұрылымға ие тозанданатын ұнтақтардан "Берілуі" мүмкін, балқытылған бөлшектерді төсенішке қаптау кезінде тез салқындату арқылы пайда болады. Ұнтақ құрылымының пайда болуы ол жабында балкуға ұшырамаған бөлшектерден жабындар түзілген жағдайда жүреді. Детонациялық тозандану кезінде балқытылған бөлшектердің төсенішке келіп жабысып, тез салқындауы метастабильді фазалардың кристалдануына жағдай жасайды. Мысалы,  $\alpha-Al_2O_3$ -тен тұратын  $Al_2O_3$  ұнтағын детонациялық тозандағанда жабында  $\gamma-Al_2O_3$  түзіледі [233]. Дееви және басқалары [234] тозандау әдістері мен оларды қолдану көлемін ұлғайту үшін реакциялық термиялық тозандауды қолдануды ұсынған. Жылулық тозандау кезінде химиялық белсенді металл бөлшектердің газ тәрізді реактивтермен өзара әрекеттесуі, металл матрицасында өзара байланысқан бөлшектердің пайда болуына мүмкіндік береді [235, 236].

Бүгінгі таңда детонациялық жабындарда метақалыпты фазалардың түзілуін болдырмауға мүмкіндік беретін әдістемелер әзірленді. [237] жұмыста айтылғандай, нәтижеге қол жеткізу тек бірқатар қосымша шарттарды орындау кезінде ғана мүмкін болады:

- ұнтақ бөлшектерінің қызуы,
- төсеніш материалын жылыту,
- төсенішпен жанасу кезінде тозаңданатын бөлшектердің деформация дәрежесін арттыру,
- $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  фазасын жасанды қалпына келтіруді белсендіруге мүмкіндік беретін беттік белсенді заттардың тозаңданатын материал құрамына енгізу [238]. Алайда, бұл процедура (рәсім) өте қымбат.

Елеулі экономикалық шығындарсыз одан әрі жақсарту (кеуектілікті азайту және коррозияға және тозуға төзімділікті арттыру) кейіннен жоғары температуралы жағумен ұнтақ жабындарын қалыптастыру жолымен мүмкін болады [238, б. 89].

Плазмалық, ауа плазмалық, жоғары жылдамдықты газ жалынды тозаңдау сияқты әдістермен алынған  $\text{Al}_2\text{O}_3$  және басқада композиттік материалдардан керамикалық жабындардың құрылым-фазалық, механикалық және басқада қасиетін жақсартқанмен, өзіндік кемшіліктерді де байқадық яғни алынған жабынның кеуектілігі жоғары, адгезиялық беріктігі, тозуға және коррозияға төзімділігі айтарлықтай жоғары емес екенін, сонымен бірге барлық әдістерде тозаңдаудан кейін  $\text{Al}_2\text{O}_3$  бастапқы күйі қандай фазадан тұратындығына қарамастан, соңында  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  торға айналатынын байқадық, сондай-ақ  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ -дің  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  фазалы күйге қарағанда төменірек қасиет көрсететіні айтылған.  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -не түрлі оксидтерді, карбиттерді, нитриттерді қосу арқылы түзілетін жабынның қасиетін арттыруға болатынын, бірақта жоғарыдағы жабын алу технологияларының мүмкіндіктерінің шектеулілігі қажетті сапалы жабынды алуға кедергі екенін, ал алынған жабындарды қосымша технологиялармен (лазерлік, плазмалық т.б.) өңдеу арқылы оның физикомеханикалық қасиеттерін арттыруға болатынын көреміз, бірақта бұл тиімсіз, себебі: біріншіден қосымша технология қолдану артық шығынды қажет етеді, екіншіден жабын мен төсеніш арасындағы адгезиялық беріктікті төмендетуі және микроқуыстарды (микротрешина) пайда қылуы мүмкін. Жақсартылған қасиетке ие  $\text{Al}_2\text{O}_3$  негізіндегі жабынды алу және оның физикомеханикалық және трибологиялық қасиетін жақсарту үшін келесі қосымшаларды ұсынамыз.

–  $\text{Al}_2\text{O}_3$  жабынын алуда детонациялық тозаңдау әдісінің параметрлерін (оқпанды газға толтыру мөлшері, атулар кезіндегі кідіріс уақыты) өзгерте отырып жабын алу;

–  $\text{Al}_2\text{O}_3$  жабынында төсеніштен жабын бетіне қарай  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  фазаның көлемдік үлесін арттыру;

– Төсеніш материалдың құрамында бар элементтерге ұқсас композиттік ұнтақтарды (NiCr сияқты данекерлегіш ұнтақтарды араластыру)  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -ге белгілі қатынаспен араластыру арқылы жабын бетіне қарай  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -дің пайыздық мөлшерін арттыра отырып, бірғана дозатор көмегімен детонациялық тозаңдау.

Бұл ұсынылған қосымшалар артық шығынсыз, бір жолда бірғана құралмен яғни бір дозатор арқылы жүзеге асады.

Әдебиеттік шолулардан метал бөлшектерінің беттерін тозудан, коррозиядан қорғауда оксиді ұнтақтардың көп қолданылатыны физикомеханикалық және трибологиялық қасиеттерінің жоғары көрсеткіштеріне қарай алюминий оксиді негізіндегі жабындар маңыздырақ екені және метал беттерін тозудан, коррозиядан, агрессивті орта әсерінен қорғау керектігі ерекше қажеттілікке ие екендігі анық. Дегенмен, алынған жабындар толықтай қолданысқа ие бола қоймады, яғни бұл материалдар туралы зерттеу жұмыстары осы уақытқа дейін жеткіліксіз болып отыр. Сонымен, оксиді жабын алу технологияларын ары қарай жалғасты жетілдіру, сапалы жабын алу және оны өндіріске ендіру ғылым алдындағы басты мәселелердің бірі.

### **Қорытынды және міндеттерді қою**

Әдебиет көздерін талдау көрсеткендей, отандық және шетелдік ғалымдардың еңбектері алюминий оксиді негізіндегі және басқада жабындар бойынша эксперименттердің түрлі деңгейлілігін ескере отырып, бізге  $Al_2O_3$  негізіндегі жабынды алуда микроқұрылымның қажетті қасиеттерін, таңдалған материалдың фазалық өзгерісі мен күйін жетік түсіну, сонымен бірге тозаңдау технологиясының мүмкіндіктеріне жүйелі көзқарас қажет екендігі айқын болды.

$Al_2O_3$  негізіндегі жабындарды алуда көп жағдайда ауа плазмалық тозаңдау әдісін қолданған, жабын қабаты алынғанымен кеуектілігі жоғары, тозуға төзімділігі, адгезиялық беріктігі төмен болған, жабынның қасиетін жақсарту мақсатында цирконий оксиді, итрий оксиді, кремний оксидін және түрлі карбиттерді қосқан, бұл қоспалар аталмыш жабынның кейбір қасиетін жақсартқанмен толықтай жоғары нәтижеге жетуге мүмкіндік бермейді. Алюминий оксиді негізіндегі жабынның қасиетінің жоғарлауына, жабынды алу технологиясының мүмкіндік деңгейі мен тозаңданатын ұнтақтың розмірінің әсері үлкен. Алюминий оксиді негізіндегі ұнтақтарды балқытып тозаңдатуға жоғары температура қажет, сондай-ақ алюминий оксиді бір өзі температураның әсерінде бірнеше модификациялық күйге түрлене алады, осы қасиетін ескере отырып жоғары температуралық жарылысты тудырудың қарапайым, хауіпсіз әрі арзан тәсілі ретінде детонациялық тозаңдауды қолдану тиімді болып саналады.

Қаптамаларды детонациялық тозаңдау әдісі кеңінен қолданылды, өйткені бұл бөлшектердің эксплуатациялық қасиеттерін, олардың жұмыс ресурсын едәуір арттыруға мүмкіндік береді. Бұл детонациялық жабындардың адгезия, тозуға төзімділік, кеуектіліктің басқа типтегі газотермиялық жабындыларына қарағанда едәуір жоғары мәндеріне ие екендігіне байланысты. Детонациялық жабындар әдісін кеңінен қолданып (мысалы, машина жасау, әуе-ғарыш, атом, мұнай-газ кеме жасау, металлургия, газ турбиналық машина жасау және т.б. салаларға арналған бөлшектер мен жабдық бөліктерін қатайту (беріктендіру) үшін алынған жабындардың қасиеттерін едәуір арттыру қажет.

Метал бөлшектерінің бетін қажетті берілген қасиетке ие жабынның физикалық-механикалық сипаттамаларының айырмашылықтарын азайтуға мүмкіндік беретін градиентті жабындарды қолдану есебінен қасиеттерінің айтарлықтай жоғарылауына қол жеткізуге болады, демек, ұштасқан қабаттардың

бөлу шекарасында жүктеме кезінде туындайтын кернеудің секіруі. Әр түрлі қабаттарда (жабындының қимасы бойынша) қасиеттерінің әртүрлі мәндері бар детонациялық жабындарды алу идеясы бұрыннан айтылғанына қарамастан, қазіргі уақытқа дейін олар іс жүзінде қолданылмады.  $\gamma$  фазаның түзілуі газотермиялық, ауа плазмалық, плазмалық және т.б. әдістермен алынған алюминий оксиді негізіндегі жабындардың барлығына ортақ проблема. Ол алюминий ұнтағының бастапқы  $\alpha$  фазалы күйден, тозаңдаудан кейін  $\gamma$  фазалы күйге ауысатыны,  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  фаза  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  фазаға қарағанда төменірек қасиетке ие, яғни қаттылығы, коррозияға тұрақтылығы және тозуға төзімділігі төменірек. Сол себепті жоғарыдағы әдебиеттік шолуларға негізделіп отырып газотермиялық әдісті жетілдіру қажет деген шешімге келдік. термиялық өңдеудің және детонациялық тозаңдау параметрлерінің алюминий оксиді негізіндегі жабынның физикомеханикалық және трибологиялық қасиеттеріне әсерін **зерттеу мақсаты** ретінде алдық. Мақсатқа жету үшін келесі міндеттерді алға қойдық:

**Диссертациялық жұмыстың мақсаты** алюминий оксиді жабынының құрылымдық-фазалық күйі мен физика-механикалық қасиеттерінің қалыптасуына детонациялық тозаңдаудың технологиялық параметрлерінің әсерін зерттеу болып табылады.

Осы мақсатқа жету үшін келесі **міндеттер** шешілді:

- детонациялық тозаңдау әдісімен алынған алюминий оксиді жабындарының құрылымы мен қасиеттеріне жылулық өңдеудің әсерін зерттеу;

- детонациялық тозаңдау кезінде ату жиілігінің алюминий оксиді жабындарының құрылымы мен қасиеттеріне әсерін зерттеу;

- алюминий оксиді жабындарының құрылымдық-фазалық күйінің, механикалық және трибологиялық қасиеттерінің қалыптасуына детонациялық оқпанды жарылғыш қоспамен толтыру дәрежесінің әсерін зерттеу;

- жоғары механикалық және трибологиялық сипаттамаларға ие градиентті жабындарды алудың детонациялық тозаңдату тәсілін әзірлеу.



## 2 ЭКСПЕРИМЕНТТЕР ЖҮРГІЗУ МАТЕРИАЛДАРЫ, ЖАБДЫҚТАРЫ МЕН ӘДІСТЕМЕЛЕРІ

Бұл бөлімде зерттеу нысандары, дайындау әдістері, жабындардың физика-механикалық және трибологиялық қасиеттерін сынау және анықтау құралдары қарастырылады. Жұмыста қолданылған барлық талдау әдістерінің құралдарына сипаттамалар келтірілген.

Эксперименттік зерттеулер Дәулет Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университетінің «Veritas» озық даму орталығында, Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университетінің Ұжымдық қолданыстағы ұлттық ғылыми зертханада және «Беттік инженерия және трибология» ғылыми зерттеу орталығында жүргізілді.

### 2.1 Зерттеу материалы

Зерттеу жұмысында қойылған міндеттерге сәйкес зерттеу объектісі ретінде 12X18H10T (AISI 304, 316, 430 болаттарының аналогы) тот баспайтын болат таңдалды (4-кесте). Зерттеу материалы ретінде осы болатты таңдау оның мұнай-газ өндіру өнеркәсібі, кеме жасау, металлургия, газтурбино жасау және т.б. үшін жабдықтардың тораптары мен бөлшектерін дайындау кезінде кеңінен қолданылуына негізделген. Ол агрессивті орта мен түрлі жүктемелердің бір мезгілде әсері кезінде жұмыс істеуге төзімді. 12X18H10T коррозияға төзімді, магнитті емес, құрамында аз мөлшерде титан бар болат. Аустениттер күрделі легіріленген қорытпаларға жатады. Қорытпада хром мен никельдің болуына байланысты бұл болат тұрақтандырылған хром-никель болаты депте аталады. Бүгінгі таңда ол тот баспайтын болаттардың барлық маркаларынан ең көп қолданылатын және кең таралған болат болып табылады. 12X18H10T-болаттың негізгі артықшылықтары жоғары беріктік, қаттылық, қаттылық және икемділік.

Кесте 4 – Болаттың химиялық құрамы 12X18H10T (салм. %)

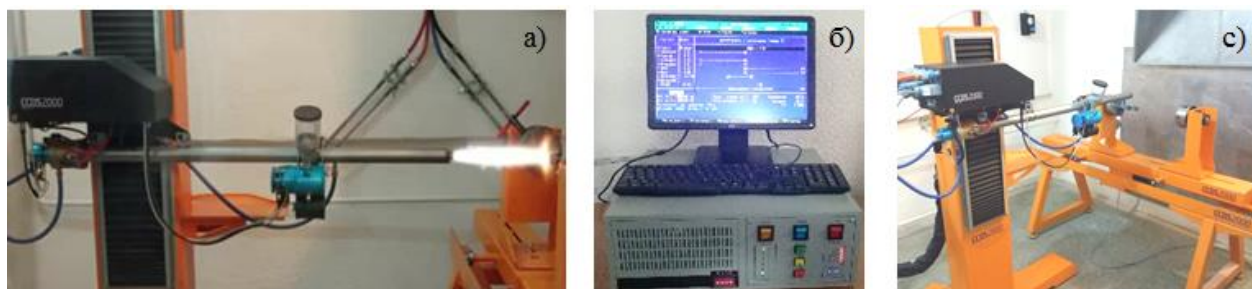
| Fe      | C    | Cr    | Ni    | Ti   | Si   | Mn   | P     | S     |
|---------|------|-------|-------|------|------|------|-------|-------|
| негізгі | 0.12 | 17.00 | 10.66 | 0.50 | 0.34 | 1.67 | 0.032 | 0.013 |

Жабындарды қаптамас бұрын төсеніш үлгілер алдымен құм бүріккішпен өңделді. Алюминий оксидінен жабынды алу үшін корунд ұнтақтары ( $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) қолданылды. Ұнтақ бөлшектерінің өлшемі 34±6 мкм. (ЖШ «Полема» ұнтақ металлургия зауыты, ISO 9001: 2015 сертификатына ие. Тула қ. Ресей).

### 2.2 Жабын алудың детонациялық тозаңдау кешені және оның құрылымы

Детонациялық жабындар CCDS2000 (Computer Controlled Detonation Spraying) осы заманғы детонациялық тозаңдаудың компьютерленген кешені көмегімен алынды. Бұл детонациялық тозаңдау құралы Ресей ғылым академиясының Сібір бөлімі Лаврентьев атындағы Гидродинамика институтында құрастырылған [239]. CCDS-2000 әр түрлі төсемдерге жабын

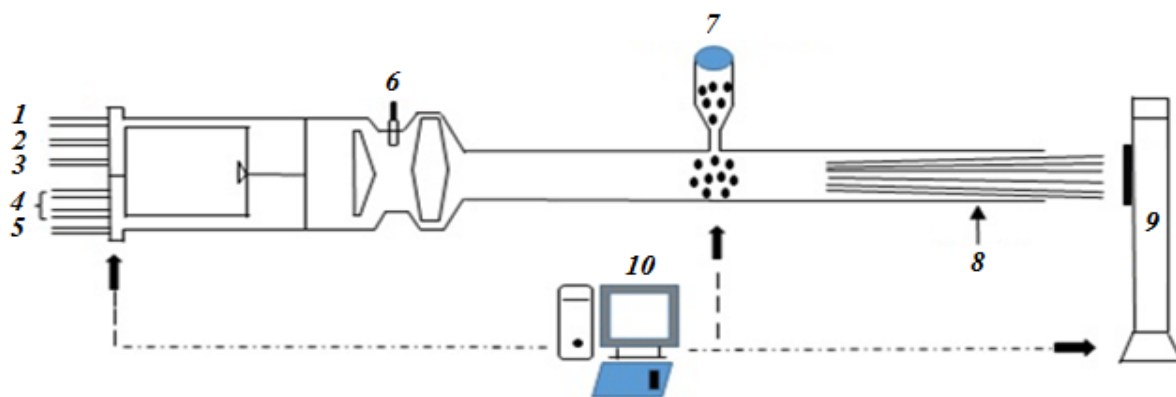
жағуға мүмкіндік береді. Комплекстің негізгі бөліктері б-а, б, с суреттерінде көрсетілген. б-суретте детонациялық тозаңдандыру процесі схемалық түрде көрсетілген. Басқа газотермиялық технологиялардан айырмашылығы детонациялық тозаңдату циклдерінің (атулардың) жүйелерінен тұратын импульстік процесс. Әдетте тозаңдағанда қондырғы секундына 10 циклға дейін жұмыс істейді, негізі CCDS-2000 кешені секундына 50 циклға дейін қамтамасыз ете алады және оның негізінде импульсті детонациялық қозғалтқыш құрылуы мүмкін. Кешен тозаңдану процесін тиімді басқаруға мүмкіндік беретін бірқатар ерекшелікке ие. Араластыру-оталдыру камерасына газдарды беру 3-4 мс-та іске қосылу уақытымен FESTO жылдам әсер ететін клапандарын пайдалана отырып, калибрленген саңылаулары бар ауысымдық жиклерлер арқылы жүзеге асырылады. Тірек қуысында 0,11 МПа артық қысым ұстап тұратын қысымды тұрақтандырғыштың есебінен жиклерлерден газдардың дыбыстық өтуі қамтамасыз етіледі, бұл берілген программалық бағдарлама бойынша тиісті клапандарды ашу-жабу жолымен детонациялық қоспада компоненттерді тура мөлшерлеу мүмкіндігіне ие. Бұл ретте оқпанның әртүрлі бөліктерінде құрамы бойынша түрлі детонациялайтын қоспалар қалыптасатын бойлық стратифицирленген заряд жасау мүмкіндігі бар.



а) оқпаннан, газ бөлу блогынан және ұнтақты дозатордан тұратын жұмыс бөлігі (оқпан); б) өнеркәсіптік компьютерлік басқару блогы; с) 3 координаттық манипуляторы бар жиынтықтағы оқпан

Сурет 6 – CCDS2000 детонациялық кешені:

Арнайы конструкцияның араластыру және тұтандыру камерасы берілетін газ компоненттерін тиімді түрде араластырып, детонациялық өнімді бірден оқпанға шығаруды қалыптастыруға мүмкіндік береді. Детонациялық фронт кейде оқпанның басым бөлігін алатын бөлікте қалыптасатын ескі типті детонациялық қондырғылармен салыстырғанда оқпанның ұзындығын азайтуға мүмкіндік берді. Газ бөлу блогының өлшемдері мен оқпан ұзындығының азаюы арқасында қондырғының барлық өлшемдері азайған, бұл оны өнеркәсіптік робот көмегімен өңдеуге мүмкіндік береді (7-сурет).



1-азот газы; 2-ацетилен газы; 3-пропан газы; 4-оттегі газы; 5-оттегі газы; 6-тұтандыру шырағы; 7- ұнтақ дозаторы; 8-бөшке (оқпан); 9-манипулятор; 10-басқарушы компьютер

Сурет 7 – CCDS2000 детонациялық кешенінің принципті сұлбасы

CCDS-2000 детонациялық кешені түрлі газ отындарында (сутегі, ацетилен, пропан-бутан, МАФ және т. б.) жұмыс істей алады. Жоғары температуралы керамикалық жабындар үшін оттегімен эквимольарлы қоспада детонация жылдамдығын  $D_u = 2934$  м/с, детонациялық фронт артындағы температураны  $T = 4516$  К және детонация өнімдерінің массалық жылдамдығын  $u = 1311$  м/с қамтамасыз ететін жоғары энергетикалық ацетилен пайдаланылады. Металдарды, әсіресе жеңіл балқитын метал ұнтақтарын тозаңдату үшін детонациялық толқынның фронтынан кейінгі температурасы төмен газ қоспаларын қолданған жөн, мысалы, пропан негізіндегі  $C_3H_8 + 3O_2$  ( $D_u = 2580$  м/с,  $T = 3769$  К,  $u = 1179$  м/с) қоспасы. МАФ +  $3O_2$  газ қоспасының детонациялық параметрлері бар:  $D_u = 2539$  м/с,  $T = 4097$  К,  $u = 1153$  м / с.

## 2.3 Зерттеудің эксперименттік әдістері

### 2.3.1 Металлографиялық талдау

Металлографиялық талдау металдың, жартылай фабрикаттардың және дайын бұйымдардың құрылымын бақылау үшін өнеркәсіпте кеңінен қолданылады. Құрылымның жалпы сипатын зерттеу үшін "NEARHOT-21" оптикалық микроскоп қолданылды. Талдаудың металлографиялық әдісі қолданыстағы бірқатар стандарттарға енгізілді. Микроқұрылым бойынша түйіршік мөлшері бақыланды МЕМСТ-5639. Сандық металлографиялық талдау жұмыста келтірілген ұсыныстарға сәйкес жүргізілді [240].

Болат үлгілерінің металлографиялық шлифтерін дайындау жұмыста баяндалған әдістемелер бойынша жүзеге асырылды. Металлографиялық микроталдау үшін жылтыратудан кейін, екі тотықты хром пастасын қолдану арқылы және азот қышқылының 10%-дық ерітіндісімен уланғанын атап өткен жөн.

### 2.3.2 Жабындардың беттік морфологиясын зерттеу әдістері

Заттың осы заманғы талдауы құрылымның физикалық және химиялық параметрлерін зерттеудің қосымша әдістерін қолдануды қамтиды, бұл құрылым мен физика-химиялық қасиеттер туралы толық ақпарат алуды қамтамасыз етеді. Бұл жағдайда затты талдау құралдың көмегімен тіркелген сигналдарды түсіндіруден тұрады, бұл жұтылған немесе шығарылған электромагниттік сәулеленудің энергия спектрінің энергиясы мен қарқындылығы, электрондар, иондар, зондтың зерттелетін бетімен өзара әрекеттесу күшінің өзгеруі және т.б. [241]. Бұл бөлімде жұмыста қолданылатын микроқұрылымды жабындарды зерттеу әдістерінің қысқаша сипаттамасы берілген.

Алюминий оксиді негізіндегі жабындардың беткі морфологиясын зерттеу Phenom ProX электронды, JSM-6390LV микроскоптарында ЭДС (EDS)-анализаторлары бар растрлық электронды микроскопия көмегімен жүргізілді. Бұл әдісті қолдану жұқа фокусталған электронды сәулемен сәулелену арқылы үлгінің ауданын немесе микрокөлемді зерттеуге мүмкіндік береді. Бастапқы сәуленің құлау бұрышының өзгеруі үлгінің әртүрлі шағын бөліктерінің топографиясын жан-жақты зерттеуге мүмкіндік береді.

Беттің кескінін алу үшін қайталама, шағылысқан және жұтылған электрондар қолданылады. Салыстырмалы түрде жоғары ажыратымдылыққа ие (30 кВ – JSM-6390LV кезінде 1,2 нм) қайталама және шағылысқан электрондардың көмегімен алынған, зерттеу 20 кВ үдеткіш кернеу кезінде нақты уақыт режимінде жүргізілді, бұл ретте сканерлеу аймағы негізгі оптикалық осіне перпендикуляр болды. Сондай-ақ, алынған алюминий оксиді негізіндегі детонациялық жабындардың беткі морфологиясын тереңірек талдау үшін АСМ-зерттеу жүргізілді. Бұл әдіспен зондтың (иненің) ұшының зерттелетін бетімен өзара әрекеттесу күшінің өзгеруі тіркеледі. Ине кантильдік сәуленің соңында белгілі қаттылықпен орналасқан, ол үлгінің беті мен нүктенің жоғарғы жағы арасында пайда болатын кішкентай күштердің әсерінен бүгіле алады. Әдістің бірқатар нұсқаларындағы бұл күштер Ван-Дер-Ваальс (молекулалық), электростатикалық немесе магниттік болуы мүмкін. Сауле бар инені кантилевер деп аталады. Кантилевердің деформациясы оның артқы бетіне түсетін лазер сәулесінің ауытқуымен немесе иілу кезінде кантилевер материалында пайда болатын пьезорезистивті әсердің көмегімен өлшенеді.

### 2.3.3 Жабындарды элементтік талдау (EDS)

Жабынның элементтік құрамын зерттеу JEOL фирмасының (Жапония) JSM-6390LV растрлық электронды микроскопының көмегімен, "OXFORD Instruments" фирмасының INCA Energy энергодисперсиялық микроанализінің приставкасымен жүргізілді. Электрондардың затпен өзара әрекеттесуі кезінде монитор экранында синхронды кескін құру үшін қолданылатын әртүрлі формадағы жауап сигналдары пайда болады. Бейнені қалыптастыру үшін электрондық-оптикалық жүйе пайдаланылмайды, бейненің ауқымын өзгерту радиотехникалық құралдармен жүзеге асырылады. Растрлық электронды микроскоп-бұл вакуумдық құрылғы, өйткені қалыпты атмосфералық қысым кезінде электронды сәуле қатты шашырайды және сіңеді, бұл оны фокустауға

мүмкіндік бермейді. Сондықтан микроскоп камерасындағы жұмыс вакуумы  $10^{-5}$  Торр немесе одан жақсы болуы керек. Зондты үлгінің бетіне жылжыту өте жоғары дәлдікпен жүруі керек. Қозғалыс дәлдігі мен зондтың мөлшері микроскоптың ажыратымдылығын анықтайды.

Беткі микроқұрылымды зерттеу үшін растрлық электронды микроскопия (РЭМ) қолданылады. Өндірілген құрылғылардың үлкейтуі оннан бірнеше жүз мың есеге дейін артады. Үлгідегі белгілі бір химиялық элементтің құрамын ғана емес, сонымен қатар таңдалған химиялық элементтердің үлгінің бетіне таралуын зерттеу мүмкіндігі растрлық электронды микроскопия әдісі арқылы жүзеге асады. Энергия дисперсиялық әдіс атомдардың ішкі энергия деңгейлері арасындағы электрондардың ауысуы нәтижесінде пайда болатын сипаттамалық сәулеленуді тіркеуге негізделген. Деңгей радиусына, сондай-ақ байланыс энергиясына байланысты спектрлердің бірнеше түрлері бөлінеді: К, L, M, бұл ретте материалтану үшін бірнеше рентген эмиссиялық сызықтары ( $K\alpha$ ,  $K\beta$  және L-сериясы) ғана маңызды [242]. 0,7-ден 10 кэВ-қа дейінгі энергия диапазонында Li-ге қосылған Si негізіндегі энергия дисперсиялық жартылай өткізгіш детекторды қолдану белгісіз элементтерді анықтауға мүмкіндік береді.

Сандық элементтік талдау өлшенетін үздіксіз сәулелену қарқындылығын қолдана отырып, қажетті элементтің концентрациясын табудан тұрады. Элементтің массалық үлесін келесі формула бойынша анықтауға болады (2) [243]:

$$C_i = \frac{I_i \cdot I_B \cdot C_{(i)} \cdot G_i}{I_B \cdot I_{(i)} \cdot G_{(i)}} \quad (2)$$

мұндағы  $C_i$  және  $C_{(i)}$  – тиісінше үлгі мен эталонның талданатын микротүйіршігіндегі  $i$  элементтің массалық үлесі;

$I_i$  - сипаттамалық рентген сәулесінің өлшенген қарқындылығы;

$I_B$  - үздіксіз сәулеленудің өлшенген қарқындылығы (интенсивность).

G-факторлардың қатынасы эталон мен үлгіде бірлік көлемдегі масса бірлігіне үздіксіз сәулеленудің тең емес қарқындылығының құрылуы мүмкін екенін ескереді [243, б. 254].

Жабындардың элементтік құрамын сандық зерттеудің қосымша әдістерінің бірі-Резерфордтың кері шашырауы. Бұл техниканың артықшылықтарының бірі-зерттеу кезінде үлгінің құрылымын бұзбау. РОР әдісі үлгінің бетін 1-ден 3 МэВ-ге дейінгі энергиясы бар иондар сәулесімен сәулелендіруге негізделген. Алынған РОР спектрі-бұл белгілі бір энергиясы бар шашыраңқы ион түсетін энергетикалық канал ( $n_i$ ) абсцисса осіне түсетін график, ал ординат осі бойынша  $n_i$  каналына түсетін иондар ( $H_i$ ) саны [242, б. 78]. Графиктің өзі-беттік шыңдар (пик) жиынтығы, олардың қарқындылығын талдау беттің құрылымы туралы ақпарат береді.

РОР-ның көптеген мүмкіндіктерінің бірі-элементтердің тереңдігі бойынша таралуын зерттеу (немесе концентрациялық профильдерді құру). Қажетті элементтің үлесі (2), (3) формуласы бойынша табылуы мүмкін:

$$C_i = \frac{N_i/N_{\text{осн}}}{\sum_i N_i/N_{\text{осн}} + 1} \quad (3)$$

$$\frac{N_i}{N_{\text{осн}}} = \frac{H_i}{H_{\text{осн}}} \left( \frac{Z_{\text{осн}}}{Z_i} \right)^2 \frac{[\varepsilon(E)]_i^{\text{эф}}}{[\varepsilon(E)]_{\text{осн}}^{\text{эф}}} \quad (4)$$

мұндағы  $H_i$  -  $i$  элемент үшін энергетикалық шыңның биіктігі;

$H_{\text{нег.}}$  - негізгі элемент үшін энергетикалық шыңның биіктігі (үлгідегі ең жоғары концентрация);

$Z_i$  және  $Z_{\text{нег.}}$  -  $i$  және негізгі элементтің атомдық нөмірлері;

$[\varepsilon(E)]_i^{\text{эф}}$  және  $[\varepsilon(E)]_{\text{осн}}^{\text{эф}}$  -  $i$ -ші және негізгі элемент үшін тиімді тежеу қимасының факторы (жоғарғы индекс тежеу ортасын білдіреді, ал төменгі – шашырау пайда болатын элементтің шашыраңқы атомы).

### 2.3.4 Рентгендік дифракциялық талдау (XRD)

Болат үлгілерінің рентгенқұрылымдық зерттеулері X'PertPRO дифрактометрлерінде рентгенқұрылымдық талдаудың белгілі әдістерімен зерітелді (С. Аманжолов атындағы ШҚМУ ұжымдық қолданыстағы ұлттық ғылыми зертханасы.). Дифрактограммаларды түсіру 40 кВ кернеу және 30 mA тоқ берілу кезінде  $\text{CuK}\alpha$  - сәулеленуді ( $\lambda=1,54178 \text{ \AA}$ ) пайдалана отырып жүргізілді. Нүктелік режимде  $2\theta = 0,02$  градус сканерлеу қадамымен.

Осы жұмыста пайдаланылатын рентгенқұрылымдық талдау әдісі зерттелетін үлгілер құрылымының келесі маңызды параметрлерін талдауға мүмкіндік берді: кристалдық құрылымды анықтау (элементарлық ұяшықтың түрі); элементарлық ұяшықтың параметрлерін дәл анықтау; зерттелетін материалдың фазалық құрамын анықтау).

Дифрактограммаларға талдау жасау PDF-4 деректер базасын пайдалана отырып жүргізілді, ал сандық талдау Powder Cell бағдарламасының көмегімен орындалды.

Сапалы фазалық талдау дифракционды сызықтардың салыстырмалы интегралды қарқындылығын және эталон аралық қабықаралық қашықтықтардың эксперименталды мәндерін салыстыруға негізделген рентгенқұрылымдық әдіспен жүргізілді [244].

Егер дифрактограммаларда осы фазаның ең қарқынды екі сызығы анықталса, белгілі бір фазаны табу фактісі болып табылады.

Дифрактометрдің жұмыс істеу принципі зерттелетін заттың кристалды торының атом жазықтығынан рентген сәулелерінің дифракциясына негізделген. Толқын ұзындығы  $X$  бар рентген сәулелерінің шоғыры кристаллға түсіп, Вульф-Брегг теңдеуін қанағаттандыратын  $hkl$  жазықтығынан көрінеді (5).

$$n\lambda=2d_{(hkl)}\sin\theta, \quad (5)$$

мұнда  $d_{(hkl)}$  – жазықтықаралық арақашықтық (межплоскостное расстояние),  $\theta$  - дифракциялық шоғырдың (пучка) шағылысу бұрышы.

$\lambda$  – толқын ұзындығы;

$n$  – реті.

Рентгендік индекстеу рентген сәулесінің әрбір желісінің барлық интерференциялық көрсеткіштерін (HKL) анықтауды болжайды. Бұл жағдайда интерференциялық индекстер  $n$  шағылу реті бойынша жазықтық индекстерінің туындысына (hkl) тең. Кристалдық жүйеге байланысты кристалдардың рентгендік үлгілерін индекстеу әр түрлі қатынасқа негізделген. Сонымен, кубтық тор үшін:

$$a = \frac{\lambda}{2 \sin \theta_i} \sqrt{H_i^2 + K_i^2 + L_i^2}. \quad (6)$$

Әр жолдың интерференциялық индекстерін орнату үшін мына қатынасты қолданыңыз:

$$Q_i = \frac{\sin^2 \theta_i}{\sin^2 \theta_1} = \frac{H_i^2 + K_i^2 + L_i^2}{H_1^2 + K_1^2 + L_1^2} = \frac{d_{H_i K_i L_i}^2}{d_{H_1 K_1 L_1}^2}, \quad (7)$$

мұндағы  $Q_i$  - ең кіші  $\theta$  бұрыштағы сызық.

Осылайша, рентгендік дифракция үлгісінің барлық сызықтары үшін  $Q_i$  коэффициенттерінің санын өсу ретімен анықтай отырып, тордың түрін, интерференциялық көрсеткіштерді және бірлік ұяшығының периодын анықтауға болады.

Сапалық фазалық талдау әдістерінің бірі - зерттелетін үлгінің жазықтық аралық арақашықтығы мен интенсивтілігінің мәндерін эталондық әдіспен салыстыру. Бұл ретте JCPDS-ASTM картотекасы ең көп қолданылады. Қатты дененің кернеулі күйін зерттеу әдістерінің бірі-рентгендік дифракция әдісі. Бұл әдіс кез келген кернеудің таралуы үшін объектінің бетіндегі әр нүктеде кернеулерді анықтауға мүмкіндік береді. Деформацияны рентген әдісімен өлшеу жазықтық кернеулі күйді қабылдауға мүмкіндік береді, себебі деформация қалыңдығы  $\sim 10$  мкм беттік қабатты білдіреді. Макро кернеуді анықтаудың әртүрлі тәсілдері бар (негізгі кернеулерді қосу әдісі, бір көлбеу түсіру әдісі, бірнеше көлбеу түсіру әдісі), бірақ олардың барлығын  $\sin^2 \psi$  Зевс деп аталатын әдіс аясында біріктіруге болады [245]. Бұл әдіс біртекті изотропты орта үшін деформация мен кернеуді байланыстыратын теңдеулерді жазуға мүмкіндік беретін кристаллиттердің хаотикалық бағытын болжауға мүмкіндік береді. Дененің деформациясын айқын көрсету үшін эллипсоидалық деформацияны қолдану ыңғайлы – бұл дененің деформациясынан кейін бастапқы деформацияланбаған денеде бөлінген бірлік радиусының сферасы өтетін бет. Қалдық кернеулерді зерттеудің рентгендік әдісі кезінде жазық кернеулі күй туралы болжамда екі осьті кернеулі күйі іске асырылады. Айта кету керек, бұл жағдайда эллипсоидалық деформация негізгі жазықтығы үлгінің бетіне сәйкес келеді, яғни координаталық осьтер сәйкес келеді. Нәтижесінде екі осьті кернеу қатынасы үшін келесі теңдеу дұрыс болады [245, б. 219]:

$$\varepsilon_{\psi,\varphi} = \frac{1+\nu}{E} \sigma_{\varphi} \sin^2 \psi + \varepsilon_3, \quad (8)$$

мұндағы  $\varepsilon_{\psi,\varphi}$  -  $\psi$  және  $\varphi$  бұрыштарымен белгіленген бағытта деформация, ол бойымен өлшенеді;

$\nu$  - Пуассон коэффициенті;

$\sigma_{\varphi}$  -  $\varphi$  бұрышы бағытындағы кернеу;

$E$  - Юнг модулі.

(8) теңдеу үшін өлшенген деформация мен  $\sin^2 \psi$  арасында сызықтық байланыс болуы керек.

Қалдық макро кернеулерді рентгенографиялық талдауды қолдану кезінде деформацияны анықтау кезінде масштаб ретінде кристаллографиялық жазықтықтар класының (hkl) жазықтықаралық қашықтығы қолданылады. Содан кейін  $\varepsilon_{\psi,\varphi}$  және  $\varepsilon_3$  шамалары түрінде ұсынылуы мүмкін [245, б. 253]:

$$\varepsilon_3 = \frac{d_3 - d_0}{d_0} = \frac{d_{\perp} - d_0}{d_0}, \quad (9)$$

$$\varepsilon_{\psi,\varphi} = \frac{d_{\psi,\varphi} - d_0}{d_0} \quad (10)$$

Мұндағы  $d_0$  - жазықтық аралығы (hkl) жүктелмеген күйде;

$d_3$  ( $d_{\perp}$ ) - үлгінің бетіне қалыпты бағытта жазықтықаралық қашықтық ( $\psi=0$ );

$d_{\psi,\varphi}$  - шиеленіс жағдайындағы жазықтықаралық арақашықтығы (hkl).

(9) және (10) арақатынасын ескере отырып, (8) теңдеу:

$$\frac{d_{\psi,\varphi} - d_0}{d_0} = \frac{1+\nu}{E} \sigma_{\varphi} \sin^2 \psi + \frac{d_{\perp} - d_0}{d_0} \quad (11)$$

Теңдеу (11) және  $\sin^2 \psi$  әдісінің негізгі қатынасы. Өлшеу дәлдігін арттыру үшін әртүрлі бұрыштарда бірнеше түсірілім жасау керек. Нәтижесінде (11) теңдеуді келесі түрде қайта жазуға болады:

$$\frac{d_{\psi_i} - d_0}{d_0} = \frac{1+\nu}{E} \sigma_{\varphi} \sin^2 \psi_i + \frac{d_{\perp} - d_0}{d_0}, \quad (12)$$

мұндағы  $\sigma_{\varphi}$  ретінде анықталады:

$$\sigma_{\varphi} = \sigma_1 \cos^2 \varphi + \sigma_2 \sin^2 \varphi. \quad (13)$$



(13) теңдеуіне сүйене отырып, рентгенография әдісі кернеуді бөлек анықтауға мүмкіндік береді  $\sigma_1$  және  $\sigma_2$ , сондықтан  $\varphi = 0^\circ$   $\sigma_\varphi = \sigma_1$ , ал  $\varphi = 90^\circ$   $\sigma_\varphi = \sigma_2$ . Нәтижесінде  $\frac{d_{\psi_i} - d_0}{d_0}$  сызықтық тәуелділік  $\sin^2\psi$ -график болып табылады.

Қалыпты кернеулердің құрамдас бөлігі  $\sigma_\varphi$   $\sin^2\psi$ -графиктің көлбеу бұрышынан [245, б. 257]:

$$\sigma_\varphi = \frac{E}{1 + \mu} \operatorname{tg} \alpha. \quad (14)$$

## 2.4 Алюминий оксиді негізіндегі жабынның механикалық және трибологиялық қасиеттерін зерттеу әдістері

### 2.4.1 микроқаттылықты анықтау

Микроқаттылық ол беріктілік пен тозуға төзімділікпен қатар, металдар мен қорытпаларда кең ауқымды қолданылатын механикалық сипаттамалардың бірі. Микротқырлықты сынау материалдардың механикалық қасиеттерін жоғары сезімталдығымен, сынауды жүргізудің аз уақытында анықтаумен басқа әдістерден ерекшеленеді. Ол үлгілердің беткі қабатын бүлдірмей жүзеге асырылады, үлгі дайындау кезінде аздаған шығынды талап етеді. Болат үлгілерінің микро қаттылығын өлшеу С. Аманжолов атындағы ШҚУ ұжымдық қолданыстағы ұлттық ғылыми зертханасының ПМТ-3 құралында МЕМСТ 9450-76 сәйкес, инденторға  $P=1\text{Н}$  жүктеме түсіру және осы жүктемені 10 сек ұстау арқылы жүргізілді. Келесі жұмыстарда материалдардың микроқаттылығын анықтау әдісі туралы, сынау кезінде орын алатын микроқұрылымдық өзгерістер туралы, микроиденттеу процестерінің физикалық табиғаты туралы толық мәліметтер бар [246].

Виккерс бойынша микро қаттылықты өлшеу кезінде индентор ретінде  $136^\circ$  қарама-қарсы жақтардың арасындағы жоғарғы жақта бұрышы бар оң төрт қырлы Алмаз пирамидасы қолданған. Бір үлгіге өлшеу саны кемінде 20 із болды. Микроқаттылықты  $H_\mu$  (15) формуласы бойынша МЕМСТ 9450-76 сәйкес анықталды.

$$H_\mu = \frac{P}{S} = \frac{1854P}{d^2} [\text{кгс}/\text{мм}^2] = \frac{18,2 \times 10^6 P (\text{кГ})}{d^2 (\text{мкм})} [\text{МН}/\text{м}^2 = \text{МПа}] \quad (15)$$

мұнда  $d$  – түскен із диагоналі, мкм;

$S = (d^2/1854)$  - алынған пирамида ізінің бүйір бетінің ауданы.

МЕМСТ 9450-76 ұсынымдарына сәйкес сынақтарды жүргізу кезінде мынадай ережелерді сақтады:

- іздің ортасынан заттың шетіне дейінгі қашықтық іздің екі еселенген өлшемінен кем болмауы тиіс;

- көрші іздердің орталықтарының арасындағы қашықтық іздің өлшемінен 3 есеге артық болуы тиіс;

- заттың немесе қабаттың ең аз қалыңдығы іздің тереңдігінен кем дегенде 10 есе артық болуы тиіс.

Қаттылық пен серпімділік модулін өлшеу "НаноСкан – 4D компакт" наноқаттылықты инденттеу әдісімен MEMСТ Р 8.748-2011 және ISO 14577 сәйкес анықталды. Сынақ 100 мН жүктеме кезінде жүргізілді.

Микроқаттылық мәндері жабындардың ішкі гетерогенділігіне байланысты белгілі бір диапазонда өзгерді. Бұл әдіс төмен қалыңдықтағы бөліктердің қаттылығын және жоғары қаттылыққа ие жұқа беткі қабаттарды анықтау үшін қолданылады. Материал неғұрлым жұқа болса, жүктеме соғұрлым аз болуы керек. *HV* Виккерстегі қаттылық саны өлшенген  $d$  мәні бойынша арнайы кестелермен анықталады (таңбалану ізі диагоналі миллиметрмен).

#### 2.4.2 Наноқаттылықты өлшеу әдісі (НаноСкан – 4D компакт)

Наноқаттылықты өлшеу Берковичтің Алмазды үш қырлы инденторымен "НаноСкан – 4D компакт" наноқаттылықты өлшеу құралында Оливер мен Фараның әдісімен жүргізілді [247, б.1575]. Сынақ 100 мН жүктеме кезінде жүргізілді. Компьютерлік бағдарламаның көмегімен сынақ параметрлері орнатылады-жүктеме, жүктеме жылдамдығы, ұстау уақыты, түсіру жылдамдығы. Жоғары дәлдікпен сынау процесінде сыйымдылық датчигінің көмегімен индентор шыңының жылжуының жүктемеге тәуелділігі тіркелді.

Құрылғыларда үстел моторлы және компьютермен де басқарылады. Наноиндентометрлер мен атом күш микроскоптарындағы (AFM) түйіндер жиынтығы, олардың функциялары мен байланыстары ұқсас және олар параллель және бір уақытта дамыды. Олардағы зондтың қозғалысын өлшеу жолының ажыратымдылығы да салыстырмалы және нм-нің жүзден бір бөлігін құрауы мүмкін. Сондықтан олар көбінесе бір кешенде немесе тіпті бір баста біріктіріледі, бұл зонд әдістерінің мүмкіндіктерін кеңейтуге және оларды заманауи нанотехнологияларда ең танымал етуге мүмкіндік береді. АҚМ және наноиндентрлеу әдістерінің жиынтығы қалыпты және бүйірлік режимдерде бетті 2D зерттеуге және берілген тереңдікте механикалық қасиеттерді 3D сипаттауға мүмкіндік береді (бірліктерден мың нм-ге дейін).

Индекстеу зерттеулерінде кинетикалық диаграмма жазылады және Юнг модулі мен қаттылығын бір уақытта анықталады және олардың қатынасы әртүрлі материалдардың салыстырмалы қаттылығын, соның ішінде әртүрлі құрылымдық күйде салыстыруға мүмкіндік береді. Бұл әдіс микромеханикалық өзгерісті және жұқа беткі қабаттардың механикалық қасиеттерінің құрылымдық сезімталдығын зерттеуге мүмкіндік береді. Сенсор бір-бірінен 200 мкм қашықтықта орналасқан екі шыны пластинаны құрайды. Үшінші пластина индентор өзегіне бекітілген. Басып шығару тереңдігі өзгерген кезде сенсордың сыйымдылығы өзгереді, бұл бізге индентор шыңының қозғалысын үздіксіз басқаруға мүмкіндік береді. Берковичтің үшбұрышты инденторы өзектің төменгі ұшына, ал жоғарғы жағында индентор катушкасы орналасқан. Катушка тұрақты магнитке орналастырылған, ал ток индуктор катушкасынан өткен кезде инденторы бар өзек магниттен шығарылады және жүктеме инденторға қолданылады. 0-ден 150 мН-ға дейінгі аралықта ток пен жүктеме арасындағы

байланыс сызықтық болып табылады, бұл инденторға қолданылатын күшті басқаруға мүмкіндік береді. Тестілеу кезінде құрылғы үш параметрді жазуға мүмкіндік береді - жүктеме, индентор ұшының жылжуы мен уақыт. Сынақ барысында Беркович инденторының жоғарғы бөлігінің жүктемеге тәуелділігі жоғары дәлдікпен тіркелді. Із түсіру тереңдігін өлшеу дәлдігі  $\pm 0,04$  нм, индентордағы жүктеме  $\pm 75$  мН. Құрылғы 1 секундта жүктеме мен қозғалудың үш өлшемін орындайды. Дірілді азайту үшін құрылғы дірілді оқшаулайтын үстелге орнатылады.

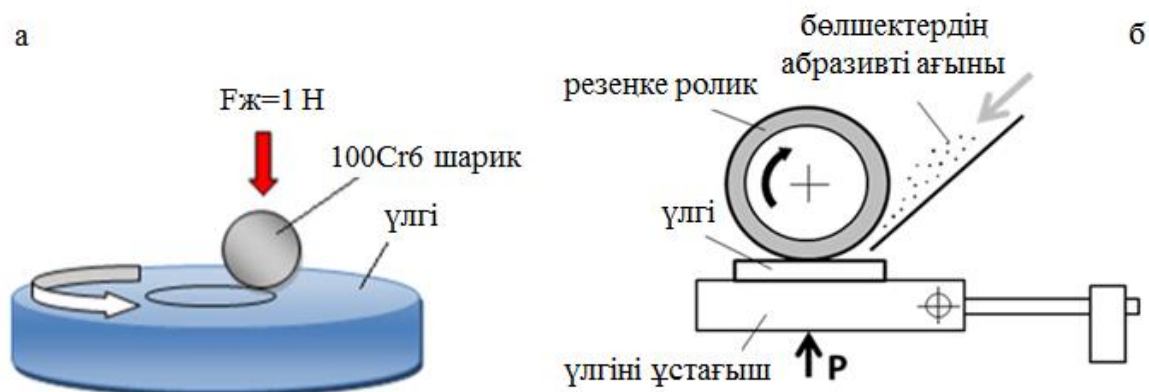
Инденторды енгізу жылдамдығы 5 нм/с әр сынақ кезінде индентор үш рет жүктеледі/түсірілді, әр уақытта 150 нм тереңдікте 10 мН аспайтын жоғары жүктеме үшін. Үлгі мен индикатор температурасының айырмашылығын азайту үшін үлгі сынақ басталғанға дейін 12 сағат ішінде құрылғыға орналастырылады. Бөлме жағдайында температура  $\pm 0,5$  °С дейінгі дәлдікпен тұрақты ұсталады. Егер индентор өзегінің жылу кеңею жылдамдығы 0,05 нм/с жоғары болса, сынақтар басталмайды. Байланыс аймағына жақын жерде кернеу енгізілгенде, біркелкі қысуға жақын күрделі кернеу күйі түзіледі, ал материалға терең таралатын деформация серпімді (қайтымды) және пластикалық (қайтымсыз) компоненттерден тұрады. Осының арқасында наноиндентрлеу кезінде қаттылық туралы да, Юнг модулі туралы да ақпарат алуға болады, сонымен қатар жалпы деформациядағы немесе серпімді қалпына келтіруде серпімді компоненттің үлесін бағалауға болады.

#### 2.4.3 Тозуға төзімділікті сынау әдістемесі (TRB<sup>3</sup> трибометрі)

Триботехникалық сипаттамаларды анықтау үшін TRB<sup>3</sup> қондырғысы қолданылды. Алынған жабындар мен жабынсыз үлгілер техникалық вазелинді қолдана отырып, "цилиндр жазықтығы" схемасы бойынша тозуға төзімділікке сыналды. Сынақ барысында үлгі үйкеліс машинасынан шығарылған жоқ. Тозу аймағындағы ойықтың ені мен ұзындығы  $\pm 0,025$  мм өлшеу дәлдігін қамтамасыз ететін МПБ-2 Бринелл микроскопының көмегімен жүргізілді. Үйкеліске трибологиялық сынақтар "шар-дискі" схемасын пайдалана отырып, "Беттік инженерия және трибология" ғылыми зерттеу орталығында TRB<sup>3</sup> жоғары температуралы трибометрі көмегімен жүргізілді (8 а сурет) (ASTM G 133-95 және ASTM G 99 халықаралық стандарттары). Контртел дене ретінде диаметрі 6,0 мм шар, сертификатталған материал – 100Cr6 пайдаланылды. Сынаулар 10 Н жүктеме кезінде және 2 см/сек сызықтық жылдамдық кезінде, 2,5 мм тозу қисығы радиусымен жүргізілді, үйкеліс жолы 60 м құрады. Трибологиялық сынақтар бөлме температурасында жүргізілді. Модификацияланған қабаттың трибологиялық сипаттамалары тозу қарқындылығымен және үйкеліс коэффициентімен сипатталды [248]. Үлгілерді абразивті тозуға сынау «айналмалы ролик - тегіс бет» схемасы бойынша абразивті тозуға сынауға арналған тәжірибелік қондырғыда MEMCT 23.208-79 сәйкес жүргізілді, ол американдық АСТМ стандартына сәйкес келеді 6568. Резеңке шеңберде абразивті тозуды тестілеу үшін үлгілердің беті тегістелген және жылтыратылған, сондай-ақ олар ацетон арқылы тазартылып, кептірілген [249].

Зерттелетін үлгінің жазық бетіне 30 Н күш түсірілген радиалды бетпен қысылған цилиндрлік резеңке ролик  $1 \text{ с}^{-1}$  жиілігімен айналды. Құралдың сұлбасы 8 б суретте көрсетілген. Резеңке доңғалақ пен үлгі арасындағы абразивті бөлшектердің түсу жылдамдығы, яғни сынау аймағына 40-43 г/мин құрады. Абразивті тозуға тексеруге қолданылған құм түйіршігінің өлшемі 200-250 мкм шамасындағы электрокорунд қолданылды. Өңделген үлгінің тозуға төзімділігі оның тозуын эталондық үлгінің (өңделмеген үлгінің) тозуымен салыстыру жолымен бағаланды. Тозу 0,0001 г-ға дейінгі дәлдікпен аналитикалық таразыда өлшенді. Үлгілер әр минут сайын өлшеніп, үш минут бойы сыналды, барлық тозу ұзындығы 30 м құрады. Өлшеу алдында үлгілердің бетіне жабысқан шаң мен құм бөлшектерін алып тастау үшін сығылған ауа қолданылды. Сыналатын материалдың тозуға төзімділігі MEMCT-23.208-79 сәйкес сынау кезінде үлгілердің массалық жоғалуы бойынша бағаланды.

Автоматтандырылған үйкеліс машинасында (PC-Operated High-Temperature Tribometer TRB<sup>3</sup>, "CSM Instruments" фирмасының, Швейцария), ауада "шарик-дискі" схемасы бойынша (8-сурет) алюминий оксиді негізіндегі жабындар мен контртелдің үйкеліс коэффициенті мен тозу жылдамдығы анықталды. Қаптамалар диаметрі  $d = 50 \text{ мм}$  және қалыңдығы  $h = 5 \text{ мм}$  болат 45 жасалған (HRC = 55) дискілерге қолданылды. Сынақ жүктемесі 10 Н болды, ал сырғанау жылдамдығы 2 см/с болды.



а – «шар-дискі» схемасы бойынша, б – «айналмалы ролик-тегіс бет» сызбасы бойынша

Сурет 8 – Алюминий оксиді жабынын трибологиялық сынау схемасы

Зерттелетін жабындардың бетіндегі тозу ойықтарының құрылысын, сондай-ақ шардың тозу дақтарының өзгеруін зерттеу арқылы контр денедегі байланыс бөлігіне зерттеу жүргізілді. Тозу ойықтарының тік қимасын профилеометр арқылы өлшеу жүргізілді, содан кейін ойықтың тереңдігі мен қиманың орташа мәні есептелді.

Қатты беті (жабыны) бар диск түріндегі үлгі берілген жиілікпен айналады. Сертификатталған шар түріндегі қарсы дене ұстағышқа қозғалыссыз бекітіледі, ол оған жүктемені береді және үйкеліс күшінің датчиктеріне және қарсы

дененің бату тереңдігіне қосылады. Байланыстың мұндай схемасы бастапқы байланыс кернеулерінің математикалық есебін жүргізуге мүмкіндік береді (Герц кернеулері). Сынақтар ASTM G99-959 және DIN50324 стандарттарына сәйкес жүргізіледі. Келесі температуралар 300°C және 500°C триботехникалық сынақтар үшін температура ретінде таңдалды.

Беттік профиль профилометр 130 профилометрінің көмегімен үлгімен механикалық жанасу жағдайында тұрақты жылдамдықпен қозғалатын алмас ұшының (қаламның) тік ауытқуын өлшеу арқылы өлшенді. Surtronic-25-те RS-232 көпфункционалды порты бар, оның көмегімен мәліметтерді принтерге басып шығаруға немесе компьютерге қосымша Talysurf қосымшасымен бағдарламалық қамтамасыз ету арқылы беруге болады. Бағдарламалық жасақтама параметрлерді есептеуге, халықаралық стандарттарға толық сәйкес есептеу режимдерін орнатуға мүмкіндік береді.

Арнайы функциялар профильдің тік/көлденең көрінісін алуға, жан-жақты тексеру үшін жекелеген аймақтарды үлкейтуге, төңкерілген профиль алуға, сонымен қатар толқындылық пен кедір-бұдырлықты бөлек есептеуге мүмкіндік береді. Жабынның тозу ойығының құрылымы яғни тозу дақтары Альтами MET 5C және Neophot-21 оптикалық микроскопының көмегімен зерттелді. Жүргізілген сынақтардың нәтижесінде жабынның және статистикалық шардың тозу коэффициенті бойынша бағаланды [250]:

$$W = \frac{V}{Pl} \quad (16)$$

мұнда  $W$  – тозу факторы [ $\text{мм}^3/\text{Н}\cdot\text{м}$ ];  
 $V$  – материалдың желіну көлемі [ $\text{мм}^3$ ];  
 $P$  – жүктеме [Н];  
 $l$  – үйкеліс жолы [м].

Шардың түсірген ізі Альтами MET 5C оптикалық инвертті микроскопының көмегімен анықталды, материалдың желінген (тозған) көлемі келесідей есептелді:

$$V_{\emptyset} = \pi h^2 \left( r - \frac{1}{3} h \right) \quad (17)$$

мұнда  $h = r - \sqrt{r^2 - (d/2)^2}$  сегменттің биіктігі;

$d$  – тозу диаметрі;  
 $r$  – шардың радиусы.

Қашықтағы жабын материалының көлемі  $V_{\Pi} = s l_{\Pi}$ , мұндағы  $l_{\Pi}$  Шеңбердің ұзындығы,  $s$ -тозу жолының көлденең қимасының ауданы.

#### 2.4.4 скрэтч-тестер әдісі

Адгезиялық-когезиондық беріктікті, сызаттарға төзімділікті зерттеу және жабынның бұзылу механизмін анықтау Revetest (CSM Instruments) скрэтч-

тестерінің көмегімен жүргізілді. Сызаттар бетіне үздіксіз өсіп келе жатқан жүктеме кезінде 200 мкм дөңгелек радиусы бар "Роквелл С" типті алмазды сфералық индентермен бетіне сызаттар түсірілді, содан кейін физикалық параметрлер тіркелді: акустикалық эмиссия, үйкеліс коэффициенті және индентордың ену тереңдігі. Сынақтар келесідей жағдайларда жүргізілді: инденторға жүктеме 0,9 – дан 30 Н – ға дейін өсті, жылдамдығы – 1 мм/мин, сызат ұзындығы 5 мм құрады, жүктеу жылдамдығы – 6,91 Н/мин, сигналды іріктеу жиілігі-60, акустикалық эмиссия-9.

Тестілеу барысында әртүрлі параметрлерді тіркеу жабындардың бұзылу кезеңдерін түзетуге мүмкіндік берді. Берілген жылдамдықпен және үздіксіз өсіп келе жатқан жүктеме кезінде индикаторды жылжыту кезінде компьютерге бірнеше сенсорлардың оқулары жазылады, атап айтқанда: жүктеме күші, акустикалық эмиссия қарқындылығы, үйкеліс күші, үйкеліс коэффициенті, сызат тереңдігі. Жабынның адгезиялық немесе когезиондық бұзылу сәті сынақтардан кейін оптикалық микроскоптың көмегімен, бес параметрдің біреуінің өзгеруі бойынша тіркеледі: акустикалық эмиссия, үйкеліс күші, үйкеліс коэффициенті, индентордың ену тереңдігі және сызаттың қалдық тереңдігі.

Деректер басқару компьютерінің қатты дискісінде сақталады. Сынақ барысында тіркелетін түрлі параметрлердің жиынтығы Әдістеменің шынайылығын және критикалық жүктемені анықтаудың дәлдігін арттырады. Скрэтч-тестілеу әдісінің қосымша артықшылықтары материалдың бұзылу түрін (когезионды немесе адгезионды) зерттеу және материалдардың жарықшақтарға төзімділігін бағалау мүмкіндігін қамтиды. Склерометрлік бас сызған кезде инденторға қалыпты және тангенс жүктемесін өлшеуге арналған құрылғыны («Роквелл С» типті Алмаз пирамидасы), индентордың қалыпты орын ауыстыру шамасын өлшеуге арналған құрылғыны, басты көтеру-түсіру құрылғысын, инденторды көтеру-түсіру құрылғысын, инденторды тангенс бағытында жылжыту жетегін қамтиды. Индикаторды жүктеу бұрандалы механизммен Сығылған серіппемен қамтамасыз етіледі. Бұл жағдайда серіппе инденторға қолданылатын жүктемені өлшеу үшін, динамометриялық жартылай сақина арқылы инденторға қысым жасайды. Жүктелген индикатор төмендетіліп, бетіне енгізіледі. Индентордың қозғалысы мен енгізу жылдамдығы индуктивті сенсормен өлшенеді. Сызаттарға төзімділік күшін өлшеу жүктеме ұяшығының (тензодатчик) көмегімен жүзеге асырылады.

Сынақ барысында сызаттар материалдың бұзылуына байланысты ғана емес, сонымен қатар пластикалық деформация нәтижесінде де пайда болады. Алмаз инденторымен материалды деформациялау процесі келесі негізгі кезеңдерден тұрады:

- инденторды берілген тереңдікке тік енгізгенде алдын ала тойтарыс беру;
- қатты инденторды қатты денеге енгізу басып шығару негізінде тән "тәждің" пайда болуына әкеледі;
- сызаттың қалыптасуының бастапқы сәтінде пирамиданың бүйір бетінің қозғалуынан туындаған бекітілген материалдың кейінгі деформациясы орын алады;

- негізгі түскен із "тәжі" бөлімі ағынға айналады;
- индентордың алдында одан әрі қозғалу кезінде ағым өседі және максималды тырналу күшімен шекті биіктікке жетеді.

Бұл кезде ағынның жоғарғы жағында материалдың жергілікті бұзылуы орын алады, нәтижесінде тырналу күші азаяды. Сынақтар нәтижесінде жабынның бұзылуына әкелетін минималды (критикалық) жүктемені ( $L_C$ ) анықтауға болады. Айта кету керек, жабынның бұзылуымен байланысты барлық тіркелген жағдайлар жабынның төсенішке нақты адгезиясын сипаттамайды. Үйкеліс коэффициенті мен акустикалық эмиссия сигналының мәндерінің өзгеруіне байланысты скрайбирлеу жүктемесінің жоғарылауымен  $L_C$  критикалық жүктемесінің сипаттамалық мәндері анықталды:

Сызаттардың төменгі бөлігінде алғашқы шеврондық жарықтардың пайда болу сәтіне жауапты сыни жүктеме  $L_{C1}$  ретінде анықталды;  $L_{C2}$ -сызаттардың төменгі бөлігінде бірнеше шеврондық жарықтардың пайда болу уақыты;  $L_{C3}$  – адгезиялық-когезиялық сипатқа ие кездегі жарылу (бүліну);  $L_{C4}$ -жабын бөліктерінің жергілікті қабыршақтауы;  $L_{C5}$  - жабынның төсеніштегі пластикалық тозуы, адгезия беріктігінің жоғалуы. Сынақ барысында тіркелетін түрлі параметрлердің жиынтығы бұл әдістеменің шынайылығын және критикалық жүктемені анықтаудың дәлдігін арттырады. Бұл әдістеме ISO DIS 20502 халықаралық стандартына сәйкес келеді.

### **Бөлім бойынша қорытынды**

Екінші бөлімде зерттеуге осы заманға сай материалдың беттік қасиетін жақсартуға арналған детонациялық тозаңдау арқылы жабын алуға бағытталған заманауи кешен мен алынған жабынның құрылым-фазалық, механикалық трибологиялық сипаттамаларын дәлелдеп көрсетуге арналған классикалық зерттеу әдістері қарастырылды. Әдебиет көздеріне шолудан кейін детонациялық тозаңдау параметрлерін өзгерту арқылы алюминий оксидінің фазалық құрамына әсер ете отырып, градиентті жабын қабатын алудың үйлесімділігі анықталды. Алюминий оксидінің фазалық өзгерісін ескере отырып, детонациялық тозаңдаудың үйлесімді физикалық параметрлер таңдалды.

Алюминий оксиді негізіндегі градиентті жабынды зерттеу үшін кешенді эксперименттік әдістер қолданылып зерттеу жасалынды. Олар жабынның құрылымы мен элементтік құрамымен таралуын, жабын бетінің өзгерісін, құрылым-фазалық өзгерісін, тереңдік бойынша бөлінуі мен таралуын, трибологиялық қасиетін және қаттылықтың өзгеруін зерттеуге арналған классикалық зерттеу әдістері болып табылады. Сонымен бірге, жабындардың адгезиялық беріктігі, абразивті тозуға, эрозияға және коррозияға тұрақтылықтары мемлекеттік және халықаралық стандарттар негізінде зерттеу жұмыстары жасалды.

### **3 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ОКСИДІ НЕГІЗІНДЕГІ ДЕТОНАЦИЯЛЫҚ ЖАБЫНДЫНЫ ЖЫЛУЛЫҚ ӨНДЕУ КЕЗІНДЕГІ ҚҰРЛЫМДЫҚ-ФАЗАЛЫҚ ТҮРЛЕНУЛЕРІНІҢ ЗАҢДЫЛЫҚТАРЫ**

#### **3.1 Детонациялық тозаңдату әдісімен жағылған Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> негізіндегі жабындының қалыңдығының оның құрылымы мен қасиетіне әсері**

Қазіргі таңда көптеген материалдар белгілі жүктеменің, немесе агрессивті ортаның әсерінде беткі қабаты жиі бүлінуге ұшырайды, экономикалық жақтан тиімсіз, түрлі әдістермен алынған жабындардың сапасы өндірістің талаптарына сай қызымет көрсете алмауда, осы кемшіліктің алдын алу мақсатында ғалымдар жаңа материалдарды ойлап табумен қатар, материалдардың беттік қасиеттерін арттыратын тиімді технологияларды әзірлеуге баса мән беруде. Осындай технологиялардың бірі саналатын жылулық тозаңдандыру метал бөлшектерінің беткі қабатының қасиетін жоғарлатудың, қалың әрі сапалы жабын алудың арзан тәсілі. Жылулық тозаңдау әдістерінің арасында детонациялық тозаңдау (DS) және жоғары жылдамдықты оксиді (HVOF) тозаңдау әдістері қатты, тығыз және тозуға төзімді жабынды алуда ең тиімді әдіс [251-253]. Детонациялық тозаңдау жоғары жылдамдықты оксиді (HVOF) тозаңдау бастапқы ұнтақ материалдың минималды тотығуымен және ыдырауымен жабуға арналған оңтайлы әдіс екені белгілі, өйткені олар жоғары жылдамдық пен салыстырмалы төмен температураны қамтамасыз етеді [254]. Жабындар автомобиль бөлшектерін, жылу қазандықтарының компоненттерін және электр қуатын өндіретін жабдықтарды, химиялық технологиялық жабдықтарды, медициналық, авиациялық қозғалтқыштарды, жер үсті және теңіз турбиналары, кеме жасау өнеркәсібінде және т.б. салаларда кеңінен қолданылады [255,256]. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> және ZrO<sub>2</sub> оксиді негізіндегі жабындар жылудан қорғағыш керамикалық жабындарды алуда жиі қолданылады. Екі оксидте жоғары температурада бір-біріне жуық жақсы қасиет көрсетеді. Себебі: бұл ұнтақтар жоғары температура әсерінен бірнеше түрлі модификациялық ауысу қабілетіне ие. Детонациялық газдарының жануы кезінде алынған температура жоғары балқу температурасына ие ұнтақ материалдар үшін жеткіліксіз. Жылулық шашырау кезіндегі Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> жабынының құрамы  $\alpha$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ ,  $\theta$  және т.б. әртүрлі фазалардан тұрады, олардың ішінде  $\alpha$  және  $\gamma$  фазалардың пайда болуы басымырақ. Бұл фазалар бастапқы материалдың сипатына және балқу мен қатаю кезіндегі сипаттамасына байланысты қалыптасады [257]. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> оксиді басқа оксидтермен салыстырғанда бағасы қол жетімді. Детонациялық тозаңдау процесі арқылы өте жақсы жабысқақ беріктігі, төмен кеуектілігі мен сығымдалатын қалдық кернеулері бар жабынды алуға мүмкіндік береді [258, 259]. Бүркілген ұнтақ бөлшектер 800–1200 м/с жылдамдықпен, детонация толқыны әсерінде төсеніш материалға (подложкаға) жетеді [260, 261]. Детонациялық әдіспен алынған жабындардың сапасы төсеніш материалының бетінің кедір-бұдырлығымен яғни (өңделу дәрежесімен), қапталатын жабын материалының химиялық құрамы, түйіршіктердің өлшеміне, детонациялық жарылысты тудыратын газдардың, қоспа ұнтақтардың қатынасына тіке байланысты. Сонымен бірге көптеген қосымшаларда бастапқы материалдың ұнтағы тек  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-тен тұрадыда, ал



детонациялық тозаңдауден кейін  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  болуы ұнтақтың құрамындағы ерітілмеген немесе жартылай балқытылған бөлшектердің болуына байланысты. Екінші жағынан,  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  балқытылған көлемнің тез кристалдануына байланысты түзіледі [262]. Кейбір ғылыми зерттеулерде  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  қасиетін жақсарту (тұрақтылығын сақтау) үшін ұнтақтарды ( $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiC}$ ,  $\text{ZrO}_2$  т.б.) қосалқы қосатыны растады [263-265]. Басқада қаптау әдістермен және детонациялық тозаңдау әдісімен алынған  $\text{Al}_2\text{O}_3$  және  $\text{ZrO}_2$  оксиді негізіндегі керамикалық жабындардың физико-механикалық, трибологиялық және құрылым-фазалық алмасулары әлі күнге дейін толығымен нақты зерттелмеген, жалғасты зерттеуді қажет етеді.

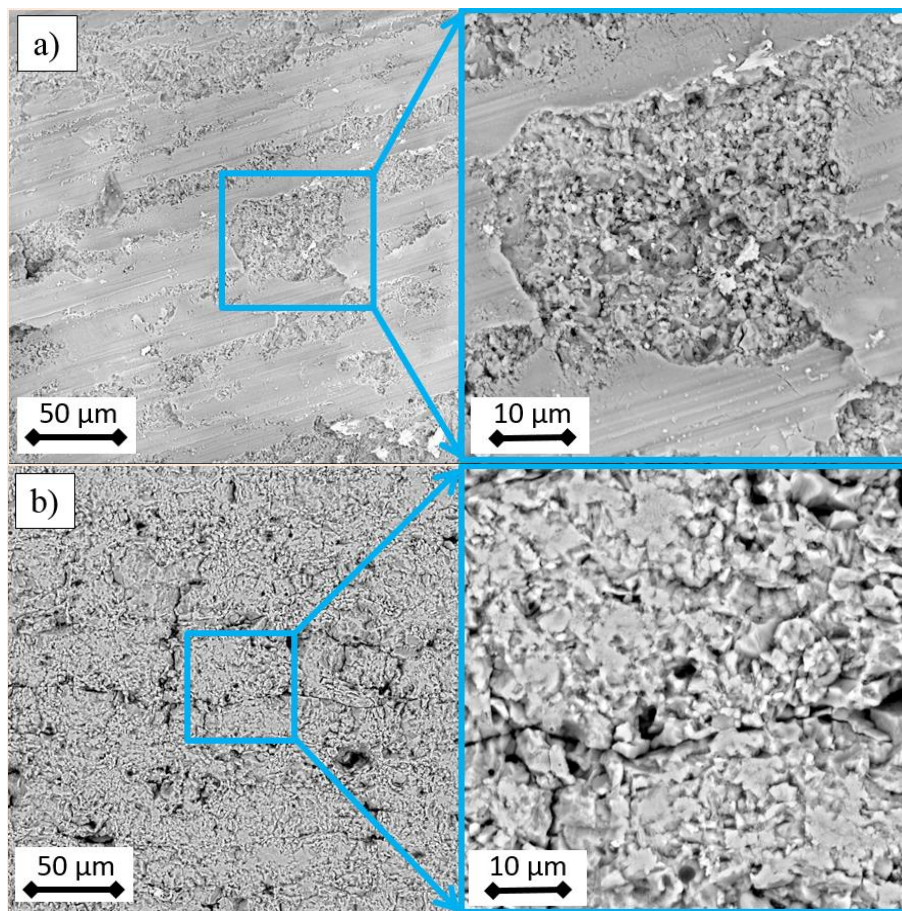
$\text{Al}_2\text{O}_3$  және  $\text{ZrO}_2$  жабындарын алу үшін детонациялық тозаңдау әдісі қолданылды. Алюминий оксиді ұнтағы (20-60 мкм) және цирконий (20-80 мкм) тозаңдау үшін қолданылады. Диаметрі 20 мм, ұзындығы 800 мм оқпаны бар "CCDS-2000" ("Беттік инженерия және трибология" ғылыми-зерттеу орталығы, Қазақстан) детонациялық қондырғысында жүргізілді. Ұнтақты ату (тозаңдау) төсеніш материалмен аралығы 250 мм болды. Жабындарды тозаңдау үшін төсеніш ретінде бастапқы бетінің кедір-бұдыры  $R_a=0.088 \mu\text{m}$  болған 12X18H10T болаты жасалған 75x50x5 мм өлшемді үлгілер таңдалды. Төсеніш бастапқыда химиялық тазарту әдісімен 7-10 минут тазартылады. Құрғатылған төсеніш 4,5 мкм орташа кедір-бұдырға жету үшін шамамен 300 мкм түйіршік мөлшері бар электрокорундты құммен атқыланды (Contracor Eco140S, Германия). Тоzaңдату параметрлері, сондай-ақ жабындарды тозаңдатқаннан кейін бетінің кедір-бұдырлығы 5-кестеде келтірілген [266-269].

Кесте 5 -  $\text{Al}_2\text{O}_3$  және  $\text{ZrO}_2$  жабындарының тозаңдануының технологиялық параметрлері және бетінің кедір-бұдырлығы

| Жабын                   | Оқпанның толтырылуы ( $\text{C}_2\text{H}_2/\text{O}_2$ ), % | Дозатордағы ұнтақтың толтырылуы, % | Қалыңдығы, мкм | Кедір-бұдырлығы, $R_a$ |
|-------------------------|--|------------------------------------|----------------|------------------------|
| $\text{Al}_2\text{O}_3$ | 71   | 66                                 | 250            | 5.10                   |
|                         |  |                                    | 500            | 2.67                   |
|                         |  |                                    | 1100           | 2.20                   |
| $\text{ZrO}_2$          | 81   | 41                                 | 250            | 1.79                   |
|                         |  |                                    | 500            | 2.29                   |
|                         |  |                                    | 1000           | 4.62                   |

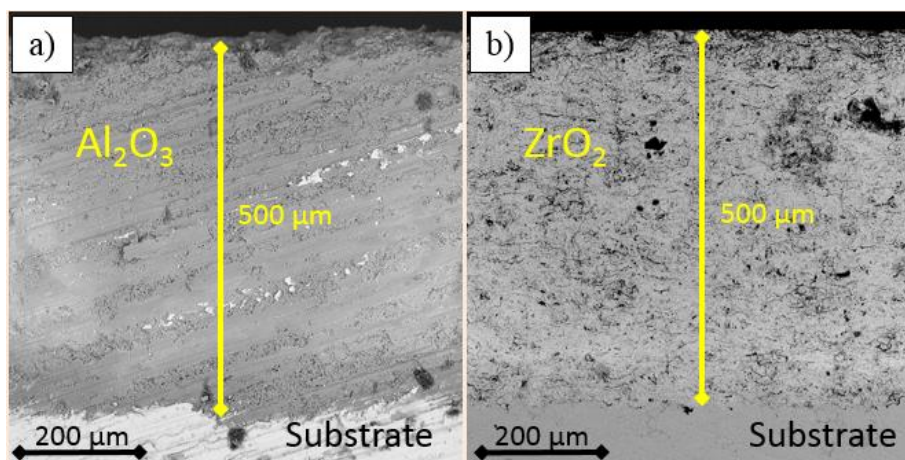
Жабын бетінің, сондай-ақ көлденең қимасының бейнесі 9 және 10-суреттерде, тиісінше, жабындардың кедір-бұдырлығының өзгеруі жөніндегі деректер ( $R_a$  бейінінің орташа арифметикалық ауытқуы) 5-кестеде келтірілген. Беткі морфологияны зерттеу қабаттың қалыңдығының ұлғаюы бетінің кедір-бұдырының төмендеуіне әкелетінін көрсетеді, бұл детонация әдісіне тән қасиет. Жабындардың көлденең қимасына нүктелік элементтік талдау жүргізілді.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  және  $\text{ZrO}_2$  жабындарының элементтік құрамы туралы мәліметтер 11-суретте

көрсетілген. Көріп отырғаныңыздай, детонациялық өңдеу кезінде жабын бетінде газ қоспасының элементтері жоқ.

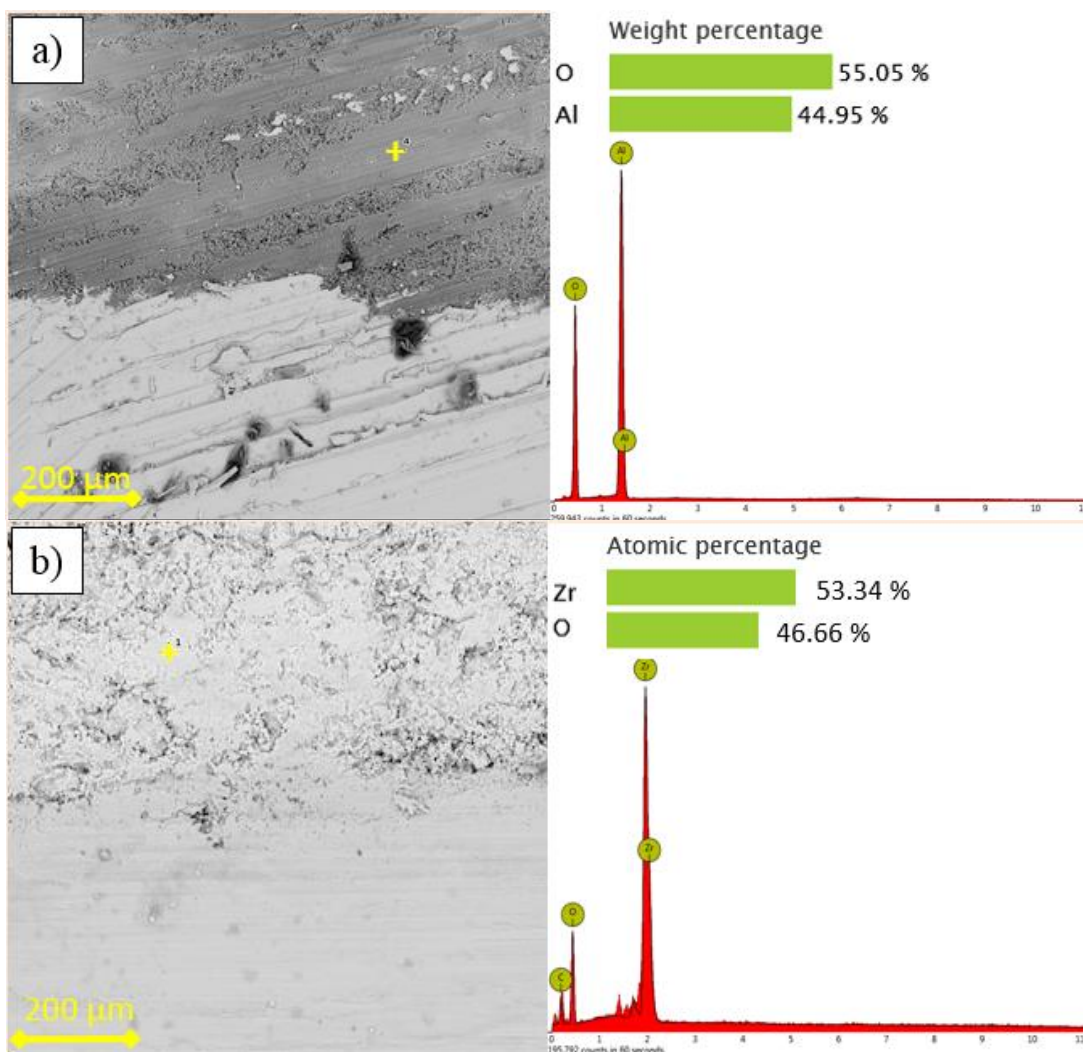


а - 500 мкм, бетінің кедір-бұдырлығы  $R_a = 5.10$  мкм, б - 1100 мкм,  $R_a = 2.20$  мкм

Сурет 9 - Әр түрлі қалыңдықта алынған  $Al_2O_3$  жабындарының бетінің құрылымы:



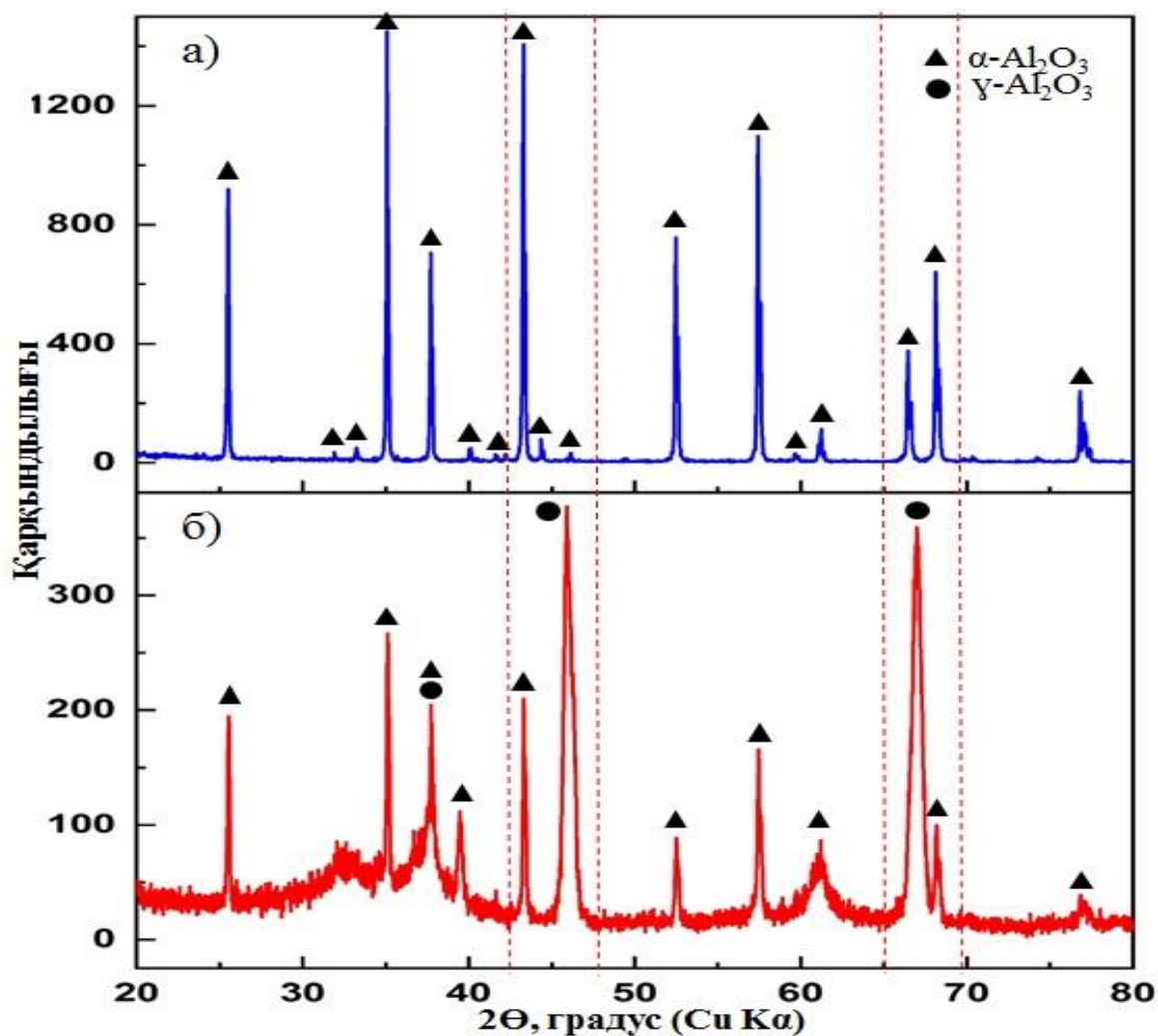
Сурет 10 - Жабындардың (a)  $Al_2O_3$  және (b)  $ZrO_2$  көлденең қимасының РЭМ-бейнесі



a)  $\text{Al}_2\text{O}_3$  және b)  $\text{ZrO}_2$

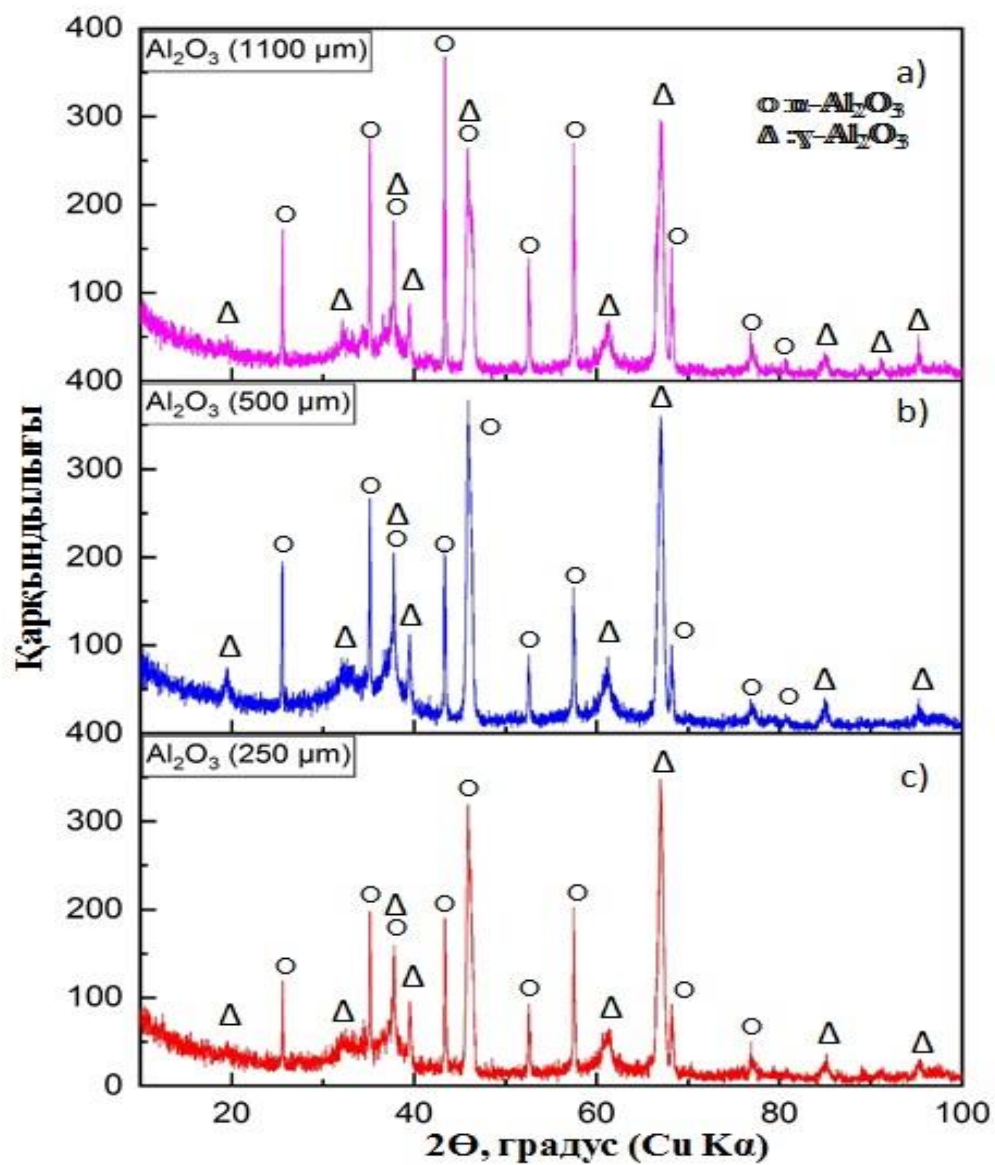
Сурет 11 - Жабындыларды РЭМ-бейнесі және ЭДС- талдауы

Рентген-фазалық талдау детонациялық тозаңдау кезінде алюминий оксидінде фазалық өзгеріс болатындығын көрсетеді: бастапқы  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ұнтағы  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ , ал жабын  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  (79%) және  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  (21%) тұрады (12-суретте). Бұл өте күтпеген жағдай, өйткені жоғарыда айтылғандай, жоғары температурада  $\alpha$ -фаза тұрақты болады. 13 және 14-суреттерде ұсынылған дифрактограммалардың ішінен жабындардың кубтық торға ие екендігін:  $Fd-3m$  кеңістіктік тобы және гексагоналды тығыз қапталған екендігі:  $\text{Al}_2\text{O}_3$  және текше үшін  $R-3C$  тобы:  $\text{ZrO}_2$  тор үшін кеңістік тобы  $Fd-3m$ . Алюминий оксиді бірнеше кристалды модификацияларда болуы мүмкін:  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\delta$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\theta$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\chi$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  және т.б. жоғары температурада барлық фазалар әдетте ең тұрақты алтыбұрышты  $\alpha$  фазасына өтеді. Бұл кристалды күйде алюминий оксиді максималды тығыздық пен қаттылыққа ие. Бөлме температурасында таза цирконий оксиді моноклин түрінде және 800-ден жоғары қызған кезде болады. 1000 °C тығыз текше модификациясына өтеді.



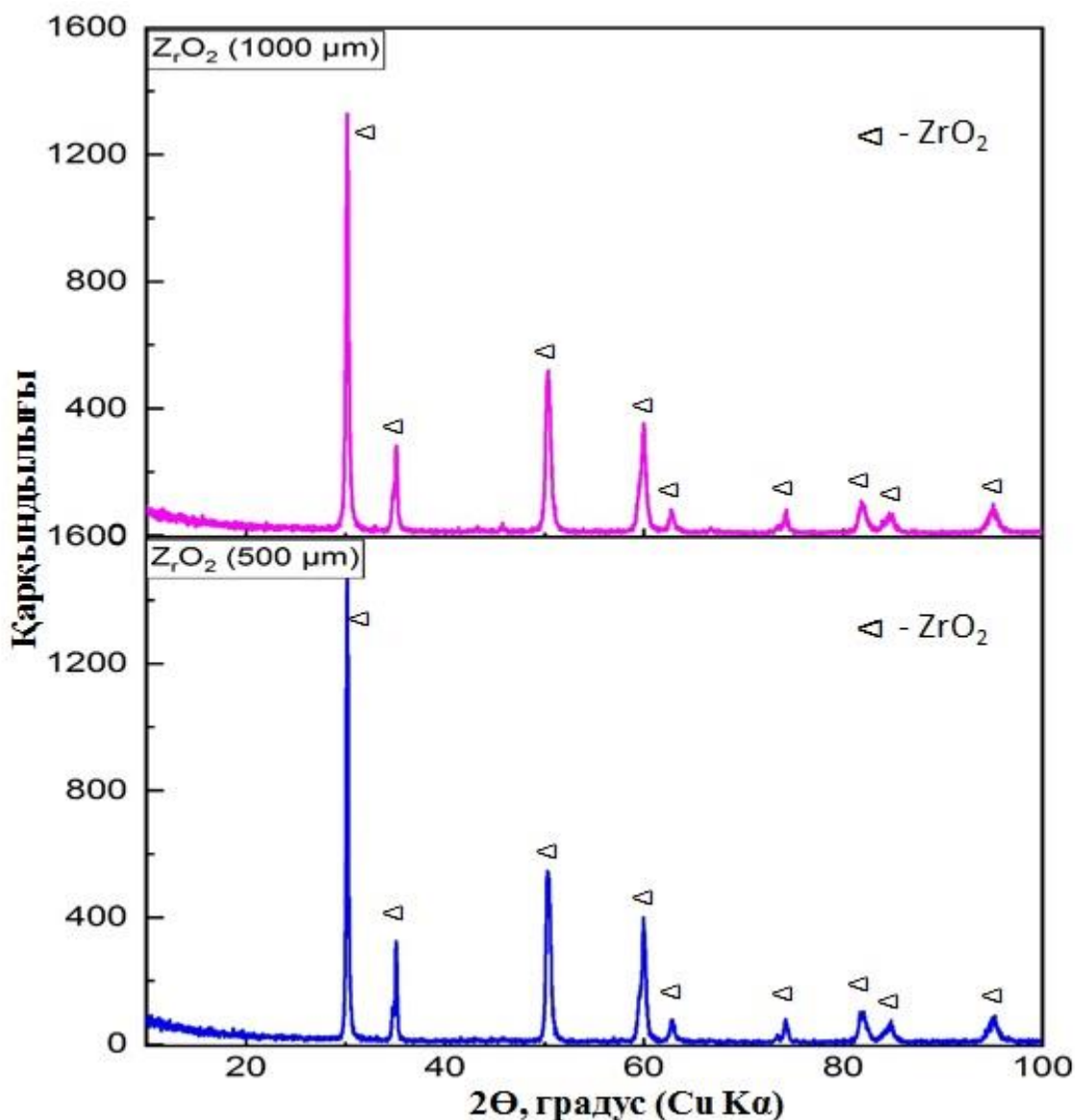
Сурет 12 - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ұнтағының бастапқы және детонациялық тозаңдаудан кейінгі рентген-фазалық талдау нәтижесі

Гипотеза ретінде төсеніштің бетіне бөлшектер тозаңданып салқындау барысында фазалық алмасу пайда болады деп болжауға болады. Ұсақ балқытылған бөлшектер соқтығысқан кезде қатты деформацияланады, Кесек әрі аз қыздырылған бөлшектер аз деформацияланады, олардың жабын қабатының қалыңдығы үлкен, сондықтан салқындату баяу жүреді және  $\alpha \rightarrow \gamma$  фазалық алмасуы орын алады [267, б. 6]. Біздің ойымызша, төсенішпен соқтығысу кезіндегі бөлшектердің жылдамдығы, температурасы және мөлшері фазалық алмасуға әсер етеді деп қорытынды жасауға болады, өйткені фазалық алмасу формасы осы параметрлерге байланысты [270].



(a) 1100  $\mu\text{m}$ , (b) 500  $\mu\text{m}$ , (c) 250  $\mu\text{m}$

Сурет 13 - Әртүрлі қалыңдықтағы алынған  $\text{Al}_2\text{O}_3$  жабынның дифрактограммасы

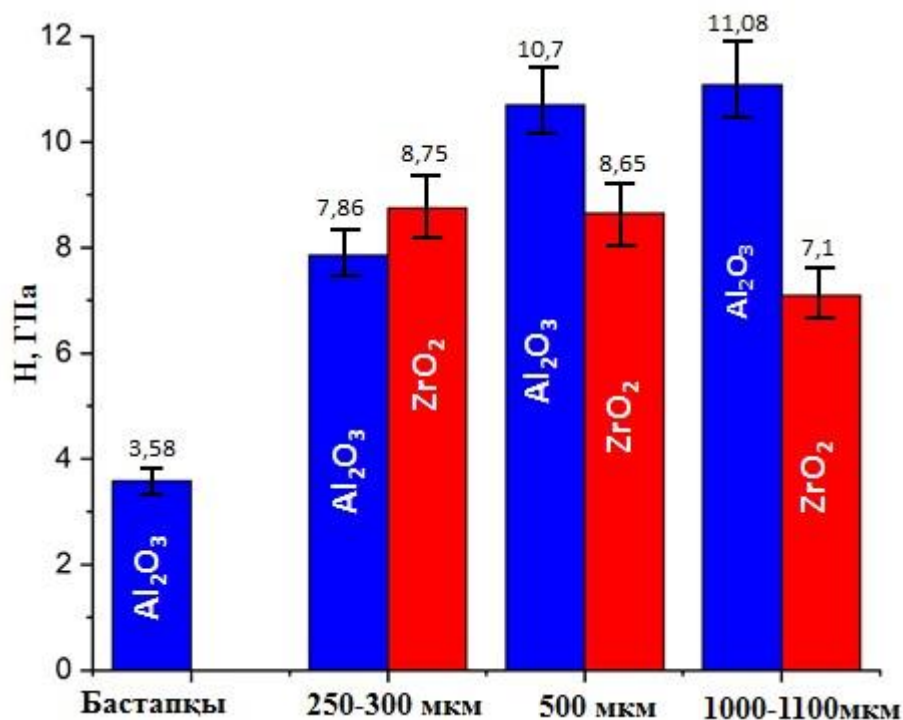


(a) 1000 μm және (b) 500 μm

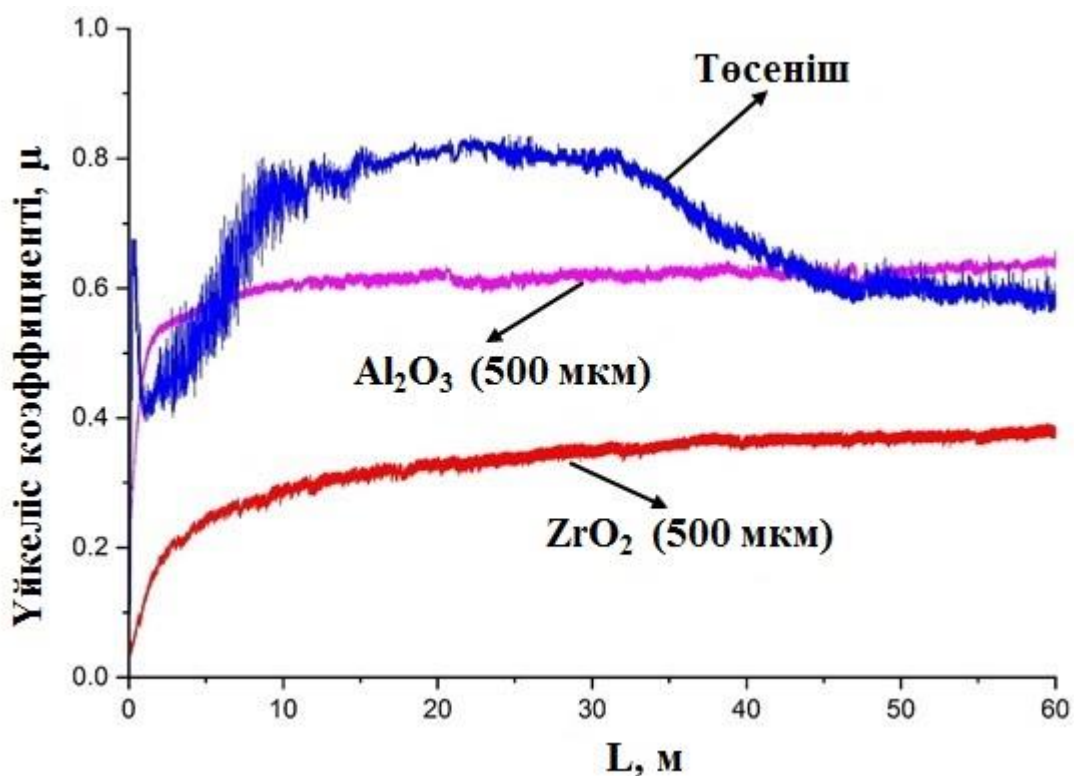
Сурет 14 - Өртүрлі қалыңдықтағы алынған ZrO<sub>2</sub> жабынның дифрактограммасы

Жабындардың механикалық қасиеттерін жеткілікті дәрежеде бағалауға мүмкіндік беретін ең әмбебап параметр-бұл оның микроқаттылығы. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> және ZrO<sub>2</sub> жабындары үшін осындай өлшеулердің нәтижелері 15-суретте көрсетілген. Жабынсыз төсеніштің микроқаттылығы (12X18H10T болат) 3580 МПа-ға тең, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (250 μm) жабындысымен тозаңдауден кейін ол 7860 МПа-ға артады, ал қалыңдығы 500 мкм және 1100 мкм-ге дейін ұлғайған кезде мәні 10700 МПа және 11080 МПа сәйкесінше, яғни субстраттың бастапқы күйімен салыстырғанда микроқаттылықтың 3 есе артуы. Жабынның қалыңдығы ұлғайған сайын микроқаттылық артты. ZrO<sub>2</sub> ұнтағымен тозаңдауден кейін 250 μm қалыңдығы бар микро қаттылық 8750 МПа - ға дейін, ал 500 μm - 8650 МПа және 1000 μm-7100 МПа-ға дейін өсті. Яғни, микроқаттылық субстраттың

бастапқы күйімен салыстырғанда екі есе өсті. Мұнда біз жабынның қалыңдығының жоғарылауымен микро қаттылықтың аздап төмендегенін көреміз [267, б. 7].

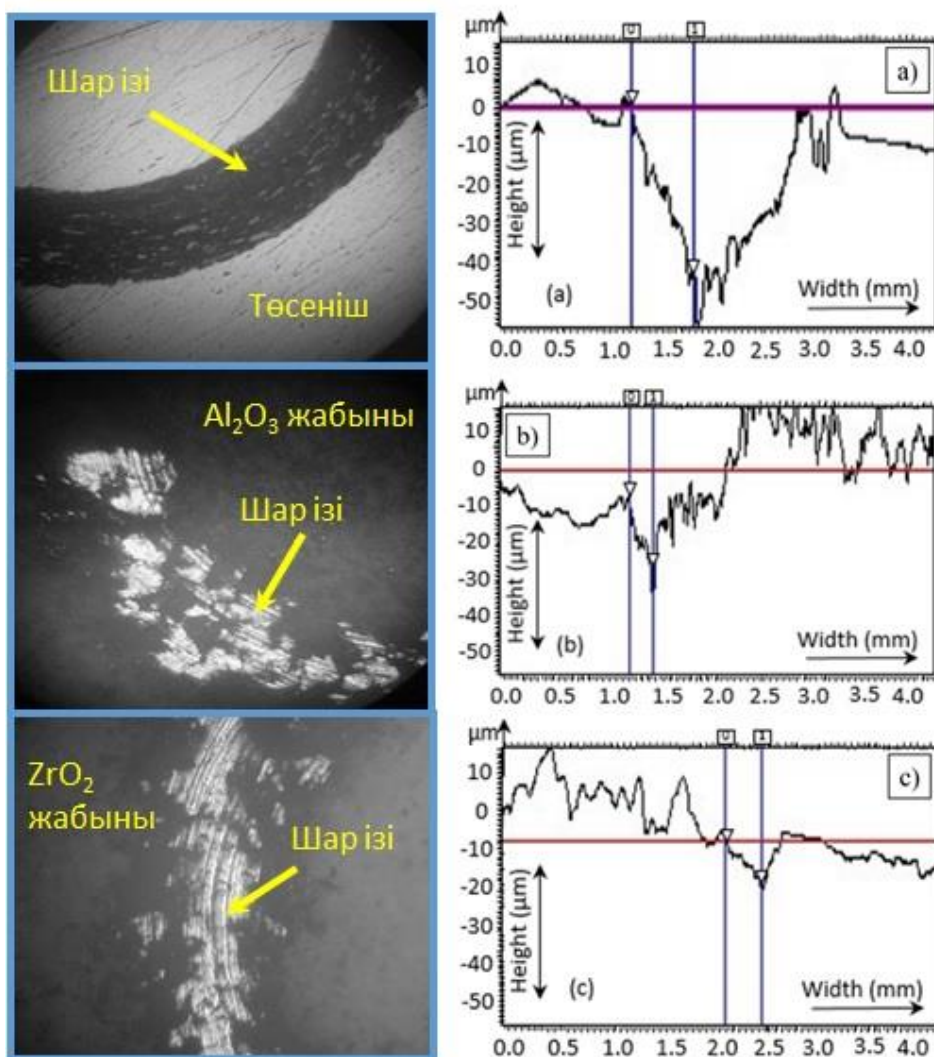


Сурет 15 - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> және ZrO<sub>2</sub> жабындарының микроқаттылығы



Сурет 16 - Берілген жүктемеден механикалық сипаттамаларды (үйкеліс коэффициенті  $\mu$ ) өлшеу нәтижелері

Екі түрлі жабынды салыстыра отырып,  $ZrO_2$  ұнтағынан жұқа жабын алынғанын көруге болады, бірақ жабынның қалыңдығына байланысты микро қаттылық көп өзгерген жоқ (15-суретті қараңыз). Zr металдың сирек кездесетін түрі болғандықтан, оны байланыстырғыш немесе жабын ретінде пайдалану жоғары сапаға әкелетіні байқалады. Детонациялық әдіспен алынған  $Al_2O_3$  және  $ZrO_2$  жабындарын трибо-тестілеу кезінде үйкеліс коэффициентінің қолданылатын жүктемеге тәуелділігін зерттеу нәтижелері 16-суретте келтірілген. Трибологиялық сынау нәтижесінде төсемнің үйкеліс коэффициентінің орташа мәні  $\mu \approx 0.669$  құрады, алюминий оксидін жаққаннан кейін үйкеліс коэффициенті  $\mu \approx 0.603$  құрады және цирконий оксидін жаққанда үйкеліс коэффициентінің орташа мәні  $\mu \approx 0.330$ -ға азайды. Жоғарыда келтірілген мәліметтерден көріп отырғанымыздай, цирконий оксидінің жабындарының үйкеліс коэффициенті алюминий оксидіне қарағанда аз [267, б. 11]. Бұл кедір-бұдырдың төмендеуі үйкеліс коэффициентін төмендететіндігімен түсіндіріледі (5-кестені қараңыз). Жоғарыда келтірілген тұжырымның дұрыстығын төсеніш беті мен жабындарының профильграммаларында да көруге болады (Сурет 17).



Сурет 17 - Жабындарының тозу іздерінің тереңдігі профильдері: Болат 12X18H10T (a) мен  $Al_2O_3$  (b),  $ZrO_2$  (c)

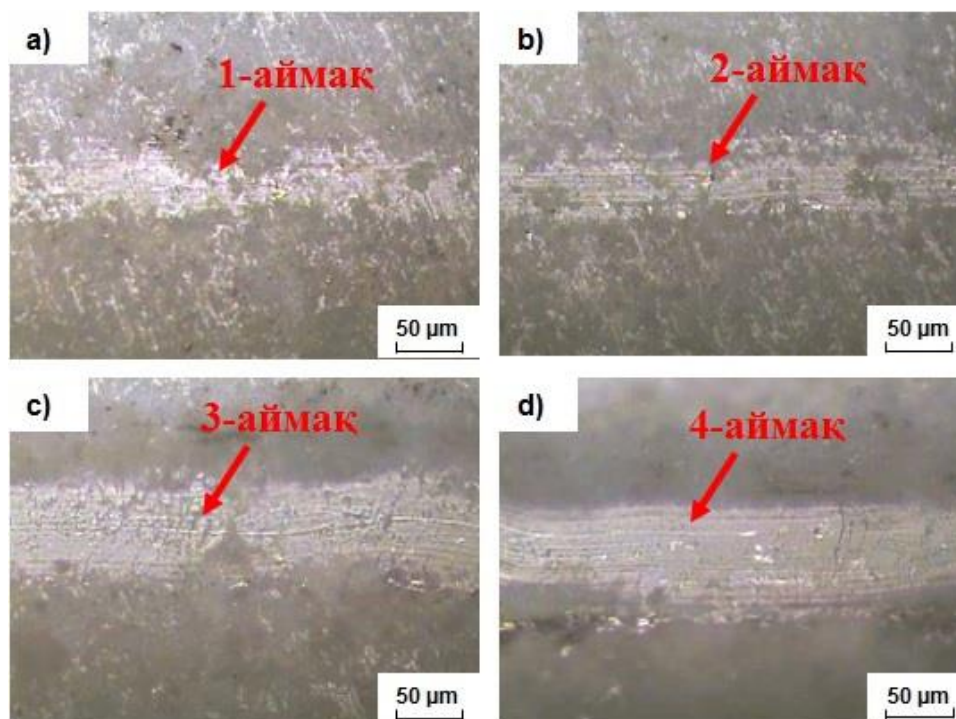


Тозу жолының тереңдігі профильдері 17-суретте көрсетілген. Тозу жолының тереңдігі профильдерінен  $Al_2O_3$  (500 мкм) және  $ZrO_2$  (500 мкм) жабындары үшін тозу жолының тереңдігі минималды екенін көруге болады. Сонымен қатар іздің максималды мәні төсенішке жатады (болат 12X18H10T).

Кесте 6 -  $Al_2O_3$  және  $ZrO_2$  жабындарының адгезиясын сынау нәтижесі

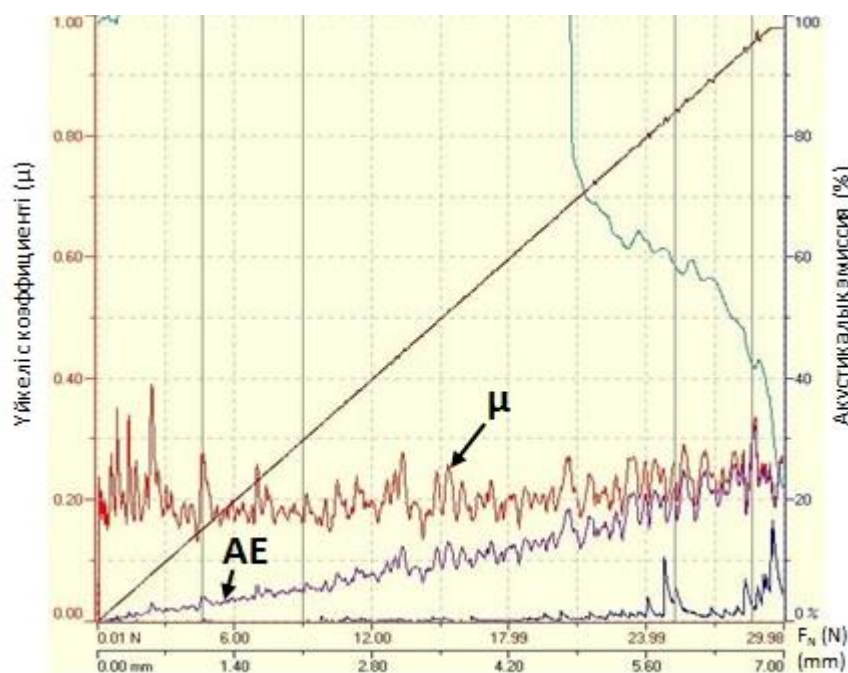
| Сыни жүктеме | Жабындар  |         |
|--------------|-----------|---------|
|              | $Al_2O_3$ | $ZrO_2$ |
| $L_{C1}$     | 4.57      | 11.06   |
| $L_{C2}$     | 8.98      | 16.32   |
| $L_{C3}$     | 25.24     | 26.28   |
| $L_{C4}$     | 28.61     | 29.65   |

6-кестеде  $Al_2O_3$  және  $ZrO_2$  жабындарын адгезиялық беріктікке сынау нәтижелері келтірілген. Жабысу күші сынақ кезінде үлгіні абразиялау кезінде ақпараттық сипатқа ие  $L_C$  сыни жүктеме мәнін білдіреді (Сурет 18). Беткі профильдерді жылтыратылған болат дискілермен (төсенішпен) және  $Al_2O_3$  жабындысымен, жарылыс температурасы (оқпанды газбен толтыру көлемі), тозаңдау жылдамдығы, алюминий оксиді ұнтағының мөлшері, оқпан мен төсеніш материал арасындағы қашықтық және т.б. беттің кедір-бұдырлығын арттырады [272, 273].



a - аймақ 1; b - аймақ 2; c - аймақ 3; d - аймақ 4

Сурет 18 -  $Al_2O_3$  жабынының тырнау (скреч-тест) сынағы кезінде алмаз инденторымен жанасатын аймақтың микрофотографиясы

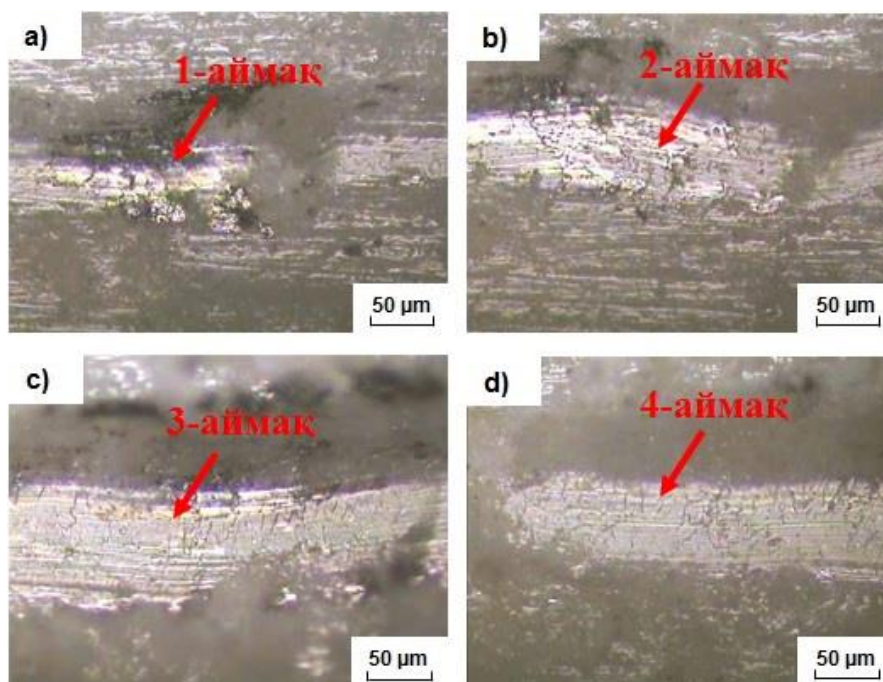


Сурет 19 -  $Al_2O_3$  жабынының жүктеме кезіндегі үйкеліс коэффициенті мен сызаттарға сынау (скреч-тест) кезіндегі қолданылатын акустикалық эмиссия сигналы арасындағы байланыс графигі

Адгезиялық-когезиондық беріктік пен сызаттарға төзімділікті зерттеу нәтижелері 19 және 20-суреттерде көрсетілген. Критикалық жүктеменің сипаттамалық мәндері қырғыш жүктемесінің жоғарылауымен үйкеліс коэффициенті мен акустикалық эмиссия сигналының мәндерінің өзгеруімен анықталды (сурет 18)  $L_C$ :  $L_{C1}$  - түбінде бірінші шеврондық жарықшақтың пайда болуы;  $L_{C2}$  - жарықтардың түбінде көптеген шеврондық жарықшақтардың пайда болуы және жабынның жергілікті қабыршақтануы, жарықтардың түбінде шеврондық жарықтардың пайда болуы;  $L_{C3}$ -жабынның когезиондық-адгезиондық зақымдануы;  $L_{C4}$  - пластикалық абразивті жабын. Жабысқақ беріктік критерийі үшін  $L_{C4}$  критикалық жүктеме мәні қабылданды, онда жабын сүртіледі. Осы өлшемдерге сәйкес индикаторды қолдану кезінде жабынның бұзылу процесін төрт кезеңге бөлуге болады. Үйкеліс коэффициентінің шамалы өсуі кезінде  $F = 0,70$  Н-ден  $4,57$  Н-ге дейінгі жүктемелер диапазонындағы жабынға индентордың монотонды енуі, ал акустикалық эмиссия сигналы өзгеріссіз қалады. Жүктеме кезінде  $F = 8,98$  Н индентор толығымен жабынға батырылады, ал үйкеліс коэффициенті  $0,35$  болатын алмас индентор жабын бойымен сырғанады. Жүктеме жоғарылаған сайын ( $F=25,2-28,6$ Н), материал индентордың алдында түйнек түрінде қысылады және индентордың ену тереңдігі артады [273 б. 50].

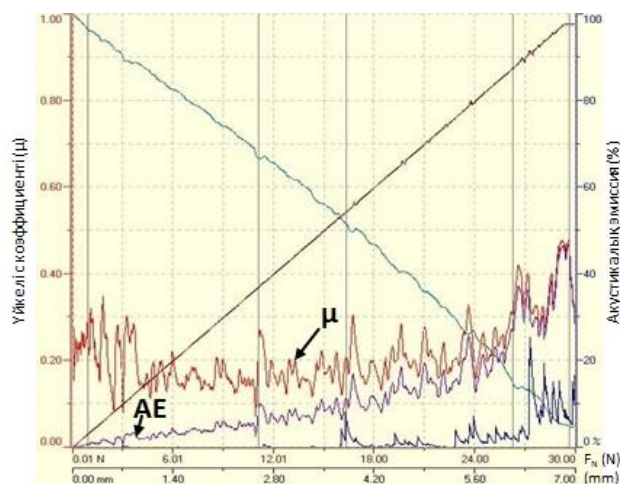
Трибологиялық зерттеуден кейін  $Al_2O_3$  төсеніш пен жабын беті Neophot-21 оптикалық микроскопымен,  $Al_2O_3$  төсеніштің беті мен жабыны диаметрі 6 мм 100Cr6 шарымен 2 см/с жылдамдықпен және 10 Н-дық күшпен бетке түсті. үлгінің бетінде 4000 айналу ізі жасалды, ал жолдың үйкеліс тереңдігі "130 Профилومتر" көмегімен анықталды. Төсеніштегі трибологиялық сынақтың

үйкеліс коэффициентінің орташа мәні  $\mu \approx 0,669$ , ойықтың тереңдігі  $h = 8,82$  мкм құрады. Алюминий оксиді ұнтағымен қапталған жабынның үйкеліс коэффициентінің орташа мәні  $\mu \approx 0,603$  болды, ойықтың тереңдігі  $h = 0,44$  мкм болды. Салыстыру үшін төсеніш пен жабынның үйкеліс коэффициентінде үлкен айырмашылық жоқ, бірақ шар салған ойықтың тереңдігі жабын материалға төсеніш материалмен салыстырғанда 20 есеге жуық аз енді (, жабынның жарылуы (сызат) пайда болуы оны тозуға әкеледі [273 б. 52].



a - облыс 1; b - облыс 2; c - облыс 3; d - облыс 4

Сурет 20 -  $ZrO_2$  жабынының тырнау (скреч-тест) сынағы кезінде алмаз инденторымен жанасатын аймақтың микрофотографиясы

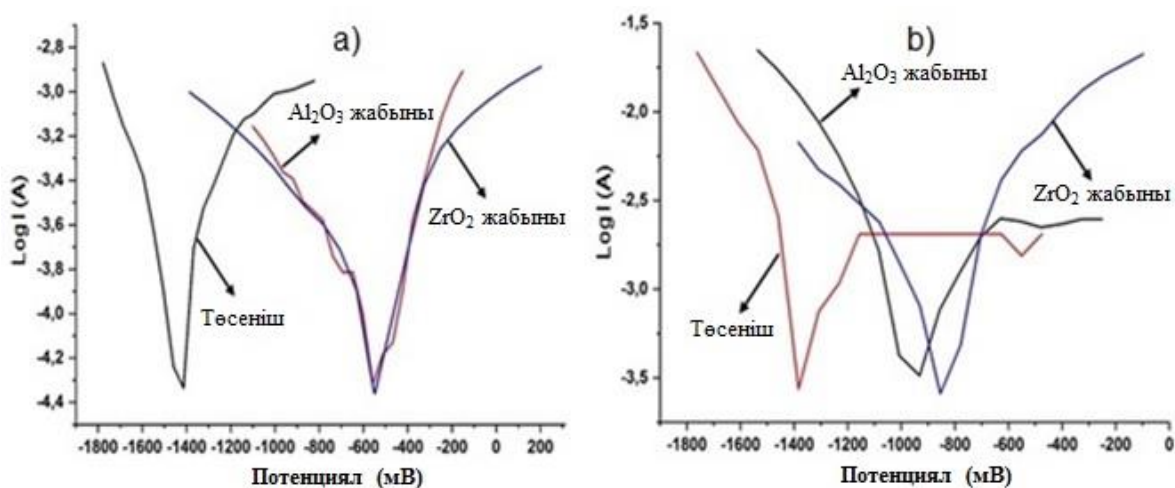


Сурет 21 -  $ZrO_2$  жабынының жүктеме кезіндегі үйкеліс коэффициенті мен сызаттарға сынау (скреч-тест) кезіндегі қолданылатын акустикалық эмиссия сигналы арасындағы байланыс графигі

Кесте 7 - Жабындардың тозуға төзімділігі мен коррозияға төзімділігінің нәтижесі

| Үлгі                                   | Болат 45 | Төсеніш | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> жабыны | ZrO <sub>2</sub> жабыны |
|--|----------|---------|---------------------------------------|-------------------------|
| $\Delta W_{[c]}$                       | 0.0308   | 0.0314  | 0.0275                                | 0.0266                  |
| K                                      | 1        | 0.968   | 2.189                                 | 1.59                    |
| R <sub>корр</sub> (см/ жыл)            | -        | 0.928   | 0.737                                 | 0.586                   |
| NaCl қышқылы                           |          |         |                                       |                         |
| H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> қышқылы | -        | 1.540   | 0.928                                 | 0.147                   |

Осы өлшемдерге сәйкес индикаторды қолдану кезінде жабынның бұзылу процесін төрт кезеңге бөлуге болады (Сурет 20). Үйкеліс коэффициентінің шамалы өсуі кезінде F=0,60Н-нан 11,06Н-ға дейінгі жүктемелер диапазонындағы жабынға индентордың монотонды енуі, ал акустикалық эмиссия сигналы өзгеріссіз қалады. Жүктеме кезінде F=16,32Н индентор толығымен жабынға батырылады, ал үйкеліс коэффициенті 0,26 болатын алмас индентор жабын бойымен сырғанады. Жүктеме жоғарылаған сайын (F=26.2-29.6Н) материал индентордың алдында түйнек түрінде қысылып, индентордың ену тереңдігі артады (Сурет 21) [273 б. 52].



а) NaCl қышқылы

б) H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> қышқылы

Сурет 22 - Төсеніш материалының, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> және ZrO<sub>2</sub> жабындарының потенциалға (E) және токқа (Log I) байланысты коррозияға төзімділігінің салыстырмалы графигі

22-Суретте төсеніштің салыстырмалы түріндегі NaCl қышқылында және 0,5 молярлық H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> қышқылында Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> және ZrO<sub>2</sub> жабындарын зерттеу нәтижелері көрсетілген (22, а-сурет) (7-кесте). Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> жабынының абразивті тозу коэффициентінің мәні төсеніш материалына қарағанда 2 есе артық екендігі анықталды, ал ZrO<sub>2</sub> жабындысының мәні 1,5 еседен асады, яғни. Детонациялық

әдіспен алынған  $Al_2O_3$  және  $ZrO_2$  жабындарының абразивті тозуға төзімді екенін көреміз.

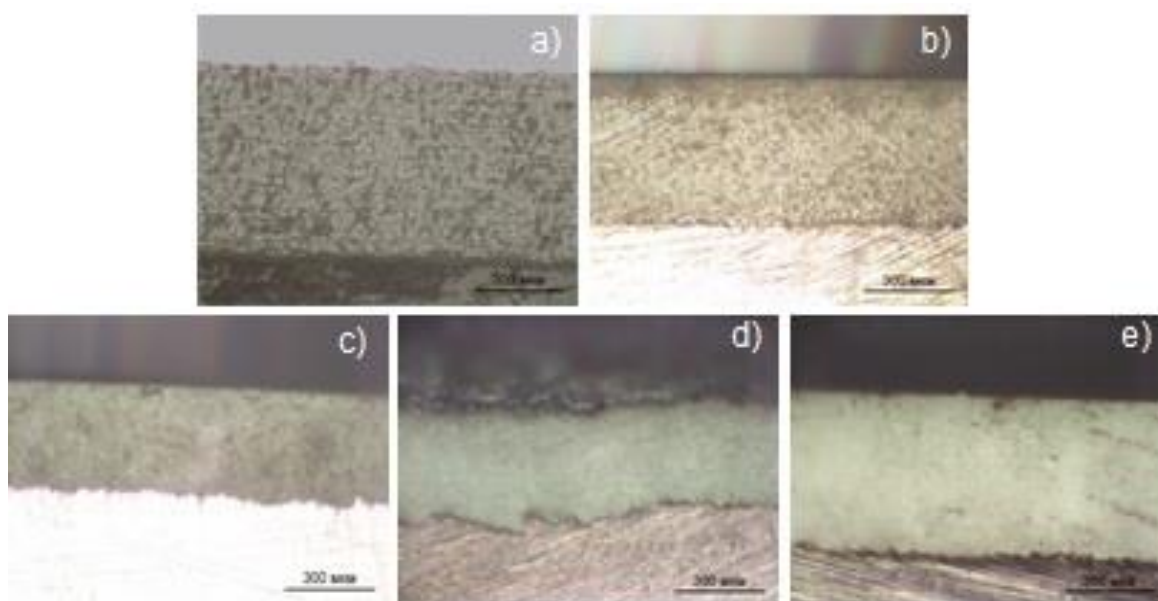
Потенциастаттың көмегімен  $NaCl$  қышқылындағы жылдық коррозияға ұшырау жылдамдығы  $R_{\text{corr}}$  төсеніште 0,928-ден (см/жыл)  $Al_2O_3$  жабындысында 0,737-ге дейін және  $ZrO_2$  жабындысында 0,586-ға дейін төмендегенін көреміз.  $ZrO_2$  жабында 0,147-ге төмендеді, коррозиялық зерттеу нәтижелері жабындардың қышқылға жеткілікті төзімді екенін көрсетті.  $Al_2O_3$  жабыны төсенішке қарағанда коррозияға 1,5 есе, ал  $ZrO_2$  жабынының коррозияға тұрақтылығы біршама жоғарырақ екендігі анықталды.

Алюминий оксиді және цирконий оксиді екі түрлі ұнтағын детонациялық тозаңдау арқылы, алынған жабынның құрылым-фазалық өзгерісіне әсерін ескере отырып, микроқаттылықтың артуы, үйкеліс коэффициенті мәнінің жабын материалдарда төмендеуі, адгезиялық беріктігінің жоғарылауы байқалды, коррозияға тұрақтылығы төсеніш материалмен салыстырғанда жоғарлады, сол себепті осы нәтижелерді ескере отырып, келесі бөлімде жылулық өңдеудің жабынға әсерін зерттеу жоспарланды.

### **3.2 $Al_2O_3$ оксидінен жасалған детонациялық жабындардың құрылым-фазалық және механикалық қасиеттеріне жылулық өңдеудің әсерін зерттеу**

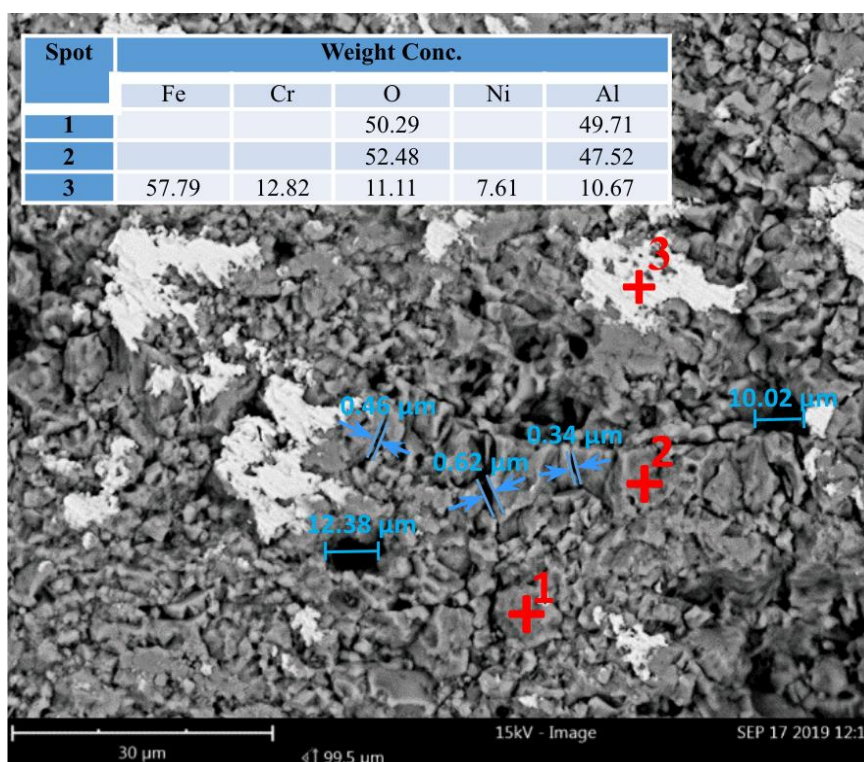
Детонациялық тозаңдау әдісімен алынған алюминий оксиді негізіндегі жабындардың құрылымы мен қасиеттеріне жылулық өңдеудің әсері зерттелген. Детонациялық тозаңдандыру CCDS2000 кешенінің көмегімен жүзеге асрылған. Жабыны бар үлгілер 500,700,800 және 1200 °C температураларда жеке-жеке 1 сағаттан жоғары вакуумда  $3.6 \cdot 10^{-4}$  Па ұсталды. Алюминий оксидінен алынған жабындардың микроқаттылығы жылулық өңдеуден кейінгі температурасына байланысты 15-30%-ға артатыны анықталды. Наноиндентрлеу нәтижелері, 1200 °C кезінде жылулық өңдеуден кейінгі жабындардың наноқаттылығы 100 %-ға жуық артатынын көрсетті. 1200 °C кезінде жылулық өңдеуден кейінгі жабындардың серпімділік модулі сәйкесінше ұлғайды, бұл жабындардың иілгіштігінің азайып, беріктігінің артуы байқалған. Алюминий оксиді жабынының жылулық өңдеуге дейінгі және одан кейінгі жабын жоғары беріктік пен тығыздыққа және аздап кеуекті болуымен сипатталған. Рентген талдау нәтижелері, алюминий оксиді ұнтағының R-3с гексагональды  $\alpha$ -тордан тұратынын, детонациялық тозаңдаудан кейін жабынның текшелері жартылай  $\gamma$ -кубтық торға ауысатыны анықталған. Алюминий оксиді жабынын 500, 700 және 800 °C температураларда жылулық өңдеу кезінде температураның өсуімен  $\gamma$ -фазаның сызықтарының интенсивтілігінің жіңішкеріп кішірейе бастағаны,  $\alpha$ -фазаның сызықтарының біртіндеп кеңейіп өсе бастағаны байқалды, Сонымен бірге күйдіру температурасы 1200 °C-қа жеткенде  $\gamma$ -фазаның бүкіл торларының жойылып,  $\alpha$ -фазаға толықтай ауысатыны анықталған. Алюминий оксиді жабынын 500-1200 °C кезінде жылулық өңдеуден кейін қаттылықтың жоғарлауы температура артқан сайын,  $\alpha$ - $Al_2O_3$  фазаның көлемдік үлесінің жоғарылауымен байланысты екені анықталған.

23-суретте жылулық өңдеуге дейінгі және кейінгі жабындардың микроқұрылымы көрсетілген. Жабындардың қалыңдығы 300-500 мкм болды. Жабын кеуекті құрылымға ие. Қуыстардың орташа өлшемі (размер) 10-15 мкм құрайды (Сурет 24) [274].



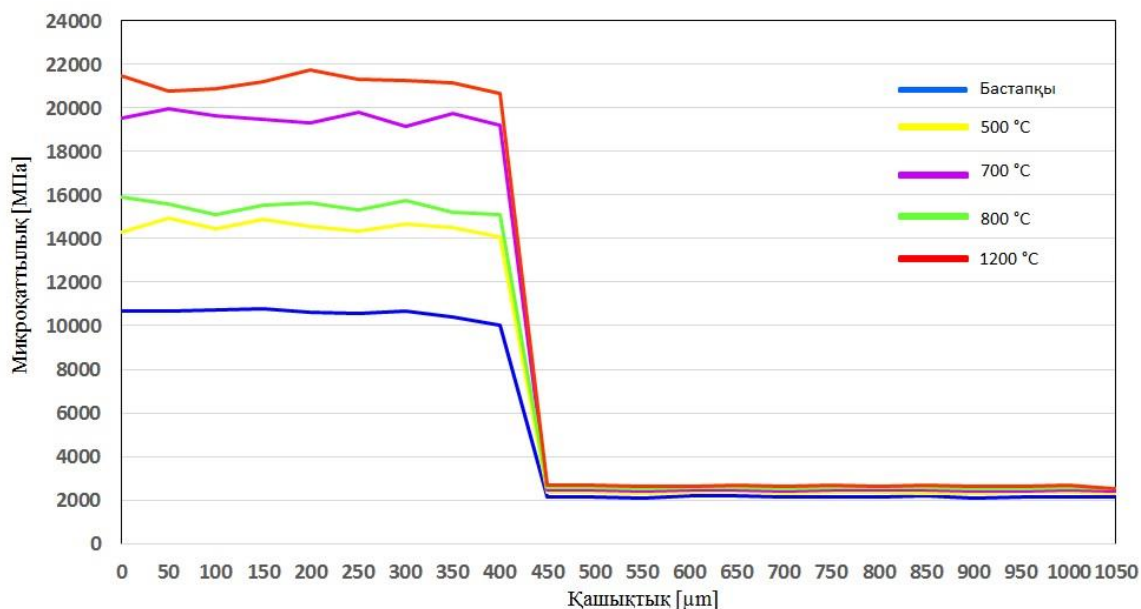
(a) 500 °C (b), 700 °C (c), 800 °C (d) және 1200 °C (e)

Сурет 23 - Алюминий оксидінен жасалған жабындардың жылулық өңдеуге дейінгі және жылулық өңдеуден кейінгі микроқұрылымы

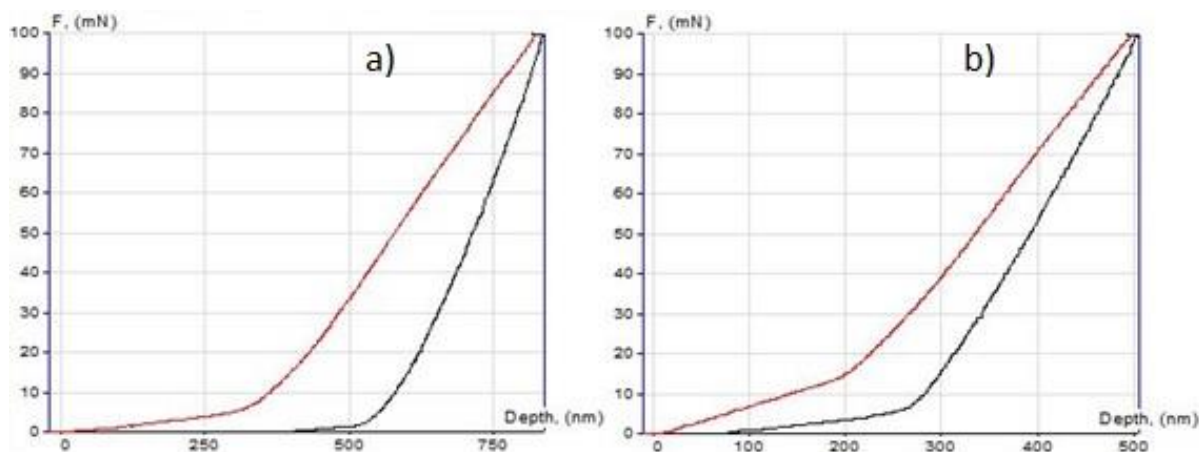


Сурет 24 - Бетінің РЭМ бейнесі

25-суретте микроқаттылықтың өзгеруінің үлгінің тереңдігінен әр түрлі температурада жылулық өңдеуге дейінгі және кейінгі тәуелділігі көрсетілген. Микроқаттылықтың максималды ұлғаюы 1200 °С температурада тазартылғаннан кейін үлгілерде байқалады. Барлық жабындар үшін қатайтылған қабаттың максималды тереңдігі 400 мкм құрайды, яғни жабынның қалыңдығына сәйкес келеді [274 б. 9].



Сурет 25 - Алюминий оксидінің жабындарының микроқаттылығы



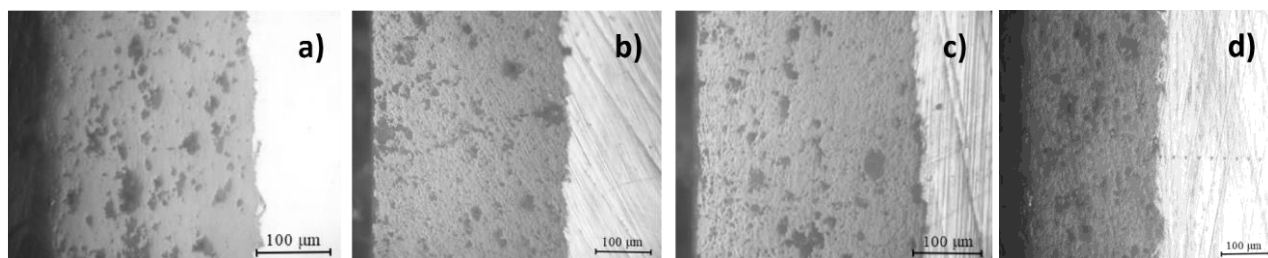
а) Жылулық өңдеуге дейін    б) 1200 °С температурадан кейінгі

Сурет 26 - Алюминий оксидінің жабынын наноиндентрлеу қисықтары

Металлографиялық және микроқаттылықты талдау нәтижесінде жылу аймағы мен диффузиялық аймақ байқалмайды. Детонациялық тозандау кезінде төсеніш тек 200-300 °С дейін қызады, төсеніштің беті құрылымдық және фазалық өзгерістерге ұшырамайды, ал күйдірілген температурада алюминий оксиді жабыны мен төсеніш арасында диффузиялық өзара әрекеттесу болмайды.

Қаптамалардың нано беріктігі сонымен қатар наноиндентрлеу әдісімен зерттелді (Сурет 26). Жабынды нано-инденфикациялау және оны термоөндеудің салыстырмалы қисықтары келтірілген. Наноиндентордың жабынға ену тереңдігі бастапқы жабынға қарағанда 20% аз екенін көруге болады [274 б. 9].

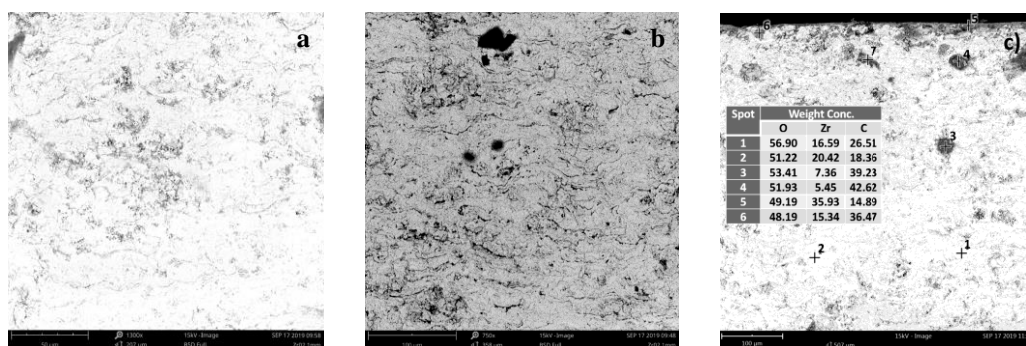
27-суретте жылулық өндеуге дейінгі және кейінгі жабындардың микроқұрылымы көрсетілген. Жабындардың қалыңдығы 360-370 мкм болды. Жабын кеуекті құрылымға ие. Жабын тесігінің орташа мөлшері 5 мкм.



a) Жылулық өндеуге дейінгі b) 900 °C c) 1000 °C d) 1100 °C

Сурет 27 - Цирконий оксидінен жасалған жабындардың микроқұрылымы

28-суретте жабындардың SEM суреттері және рентгендік микроанализдің нәтижелері көрсетілген. Жабын газды жылулық тозаңдау әдістеріне тән классикалық құрылымға ие. Қаптау жоғары тығыздық пен біркелкіліктің, сондай-ақ жеке тері тесігінің болуымен сипатталады. Тері тесігінің екі тобын бөлуге болады: өлшемі бірнеше микрометр және жұқа қабаттар түрінде микро үзілістер, олардың мөлшері ұзындығы бірнеше ондаған микрометр және қалыңдығы 0,3–1,0 мкм құрайды. Жұқа қабаттар бетіне Шашыратылған металдың балқытылған бөлшектерінің таралуы нәтижесінде пайда болады. Рентгендік микроспектральды талдау нәтижелері қалыптасқан жабын композицияны құрайтын барлық химиялық элементтердің біркелкі бөлінуімен сипатталатынын көрсетеді [275, 276].

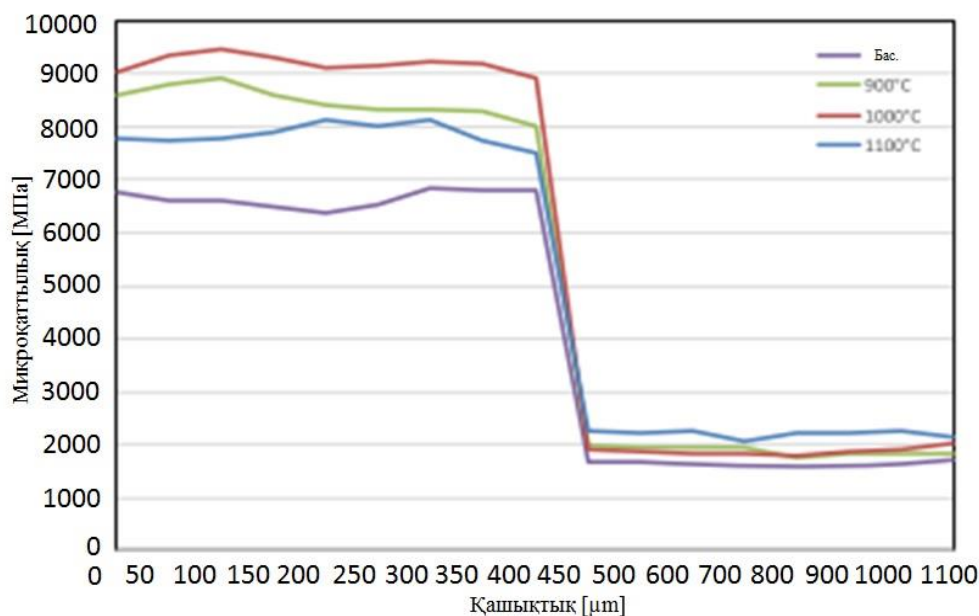


a) беткі қабатының бейнесі б) көлденең қимасының бейнесі c) микрорентгендік спектрлік талдау

Сурет 28 - Цирконий оксидінен жасалған жабынның РЭМ бейнесі

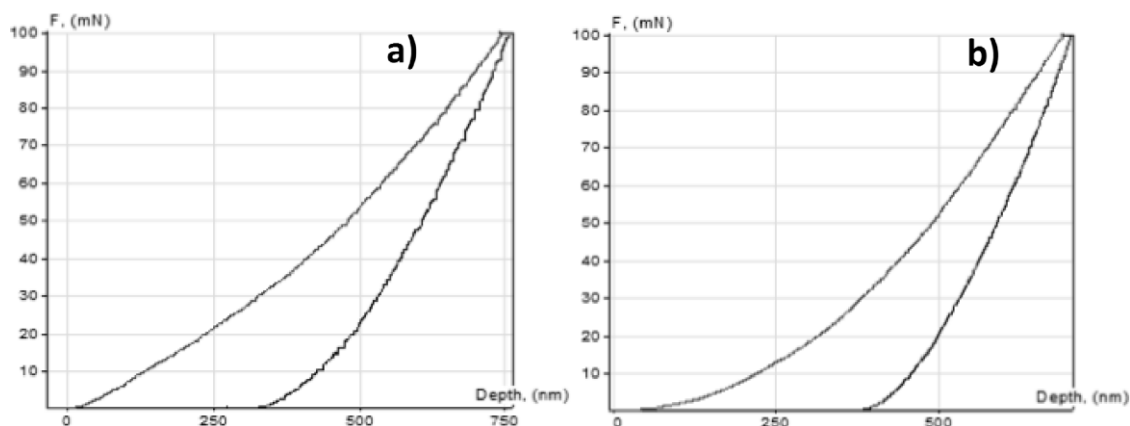


30-суретте әр түрлі температурада күйдіруге дейін және одан кейін эксперименттік үлгінің тереңдігі бойынша микроқаттылықтың өзгеру тәуелділігі көрсетілген. Микроқаттылықтың максималды ұлғаюы 1000 °С температурада тазартылғаннан кейін үлгілерде байқалады. барлық жабындар үшін қатайтылған қабаттың максималды тереңдігі 400 мкм құрайды, яғни жабынның қалыңдығына сәйкес келеді.



Сурет 29 - Цирконий оксиді жабынының көлденең қимасының микроқаттылығының өзгерісі

Металлографиялық талдау мен микроқаттылыққа сәйкес жылулық әсер ету аймағы мен диффузия аймағы байқалмайды. Детонациялық тозаңдау кезінде төсеніш тек 200-300 °С-қа дейін қызады, бұл төсеніштің беті құрылымдық және фазалық өзгерістерге ұшырамайды, ал жылулық өңдеу кезінде көрсетілген температурада цирконий жабыны мен темір негізіндегі төсеніш арасында диффузиялық процестер жүрмейді. Сондай-ақ, жабындардың нано-беріктілігін нано-индентрлеу әдісімен зерттедік. 30-суретте жылулық өңдеуге дейінгі және кейінгі жабындар үшін салыстырмалы наноиндентрлік қисықтары көрсетілген. Наноиндентердің жабынға ену тереңдігі күйдіруден кейінгі бастапқы жабынға қарағанда 10% аз екенін көруге болады [276 б. 77].



a) жылулық өңдеуге дейінгі b) 900 °С күйдіруден кейінгі

Сурет 30 - Цирконий оксидінен жасалған жабындарды наноиндентрлеу нәтижесі

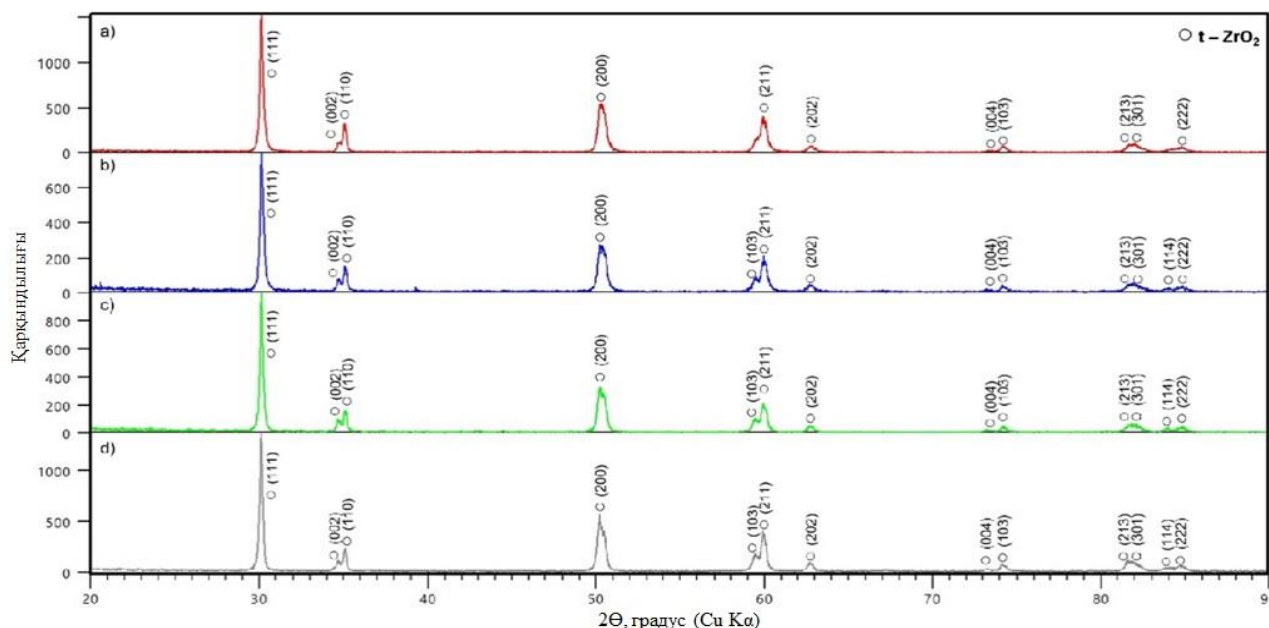
Жабындардың серпімділігі мен нанотұрақтылығы модульдері наноиндеттеу нәтижелері бойынша анықталды (Кесте 8). Нәтижелер күйдіруге дейін және одан кейінгі үлгімен салыстырғанда нанотұрақтылықтың жоғарылайтындығын көрсетті. Бұл жағдайда 15,8 ГПа нанотұрақтылығының ең үлкен мәні 1000 °С температурада күйдіргеннен кейін байқалады, 1000 °С температурада күйдіргеннен кейін жабындардың серпімділік модулі жоғарылайды, бұл жабындардың икемділігінің төмендеуін және беріктігінің жоғарылауын көрсетеді [276 б. 78].

Наноиндентрлік зерттеу кезінде жабындардың наноқаттылығы бар серпімділік модулі анықталды (Кесте 8). Нәтижелер тазартудан кейінгі үлгінің нано тұрақтылығының бастапқы деңгейге қарағанда жоғарылайтындығын көрсетті. Сонымен қатар, 20,8 ГПа нано тұрақтылығының максималды мәні 1200 °С температурада жылулық өңдеуден кейін байқалады, 1200 °С температурада жылулық өңдеуден кейін жабындардың серпімділік модулі 111 ГПа-ға артты. Бұл жабындардың икемділігі мен беріктігінің төмендеуін көрсетеді. 1200 °С температурада жылулық өңдеу кезінде наноқаттылық пен серпімділік модулінің жоғарылауын детонациялық тозаңдауден кейін пайда болған  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  және  $\alpha$  -  $\text{Al}_2\text{O}_3$  фазаларының,  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  фазасына толық ауысуымен түсіндіруге болады (Сурет 30) [274 б. 10].

31-суретте күйдіруге дейінгі және кейінгі жабындардың дифракциялық суреттері көрсетілген. Жабындарды рентгендік құрылымдық талдау нәтижелері жасарудың басында және одан кейін жабын  $t$ - $\text{ZrO}_2$  фазасынан тұратынын көрсетті. Тазартудан кейінгі үлгілердің дифрактограммасы дифрактограммадан тазартылғанға дейін ерекшеленеді, өйткені жалғыз сызықтардың орнына (211) және (222)  $t$ - $\text{ZrO}_2$  фазасы Қос сызықтар береді. Сонымен қатар, жұптарды тазартқаннан кейін, бір — біріне жақын орналасқан сызықтар (002)— (110) және (004)-(103)  $t$ - $\text{ZrO}_2$  фазалары кеңірек таралады. Мұның бәрі  $t$ - $\text{ZrO}_2$  фазасының тетраоналдылығының жоғарылауымен байланысты. Жұптасқан сызықтар арасындағы қашықтық  $c / a$  қатынасына байланысты екендігі белгілі

[277]. ол неғұрлым үлкен болса, яғни тетрагональдылық дәрежесі неғұрлым жоғары болса, соғұрлым жұп сызықтар бір-бірінен алшақ болады. Өз кезегінде, тетрагональдылық дәрежесі циркониядағы оттегінің құрамына байланысты. Біздің жағдайда, оттегінің жоғарылауына байланысты күйдіруден кейін тетрагональдылық деңгейінің жоғарылауы мүмкін, өйткені үлгілерді тазарту төмен вакуумда жүргізілді.

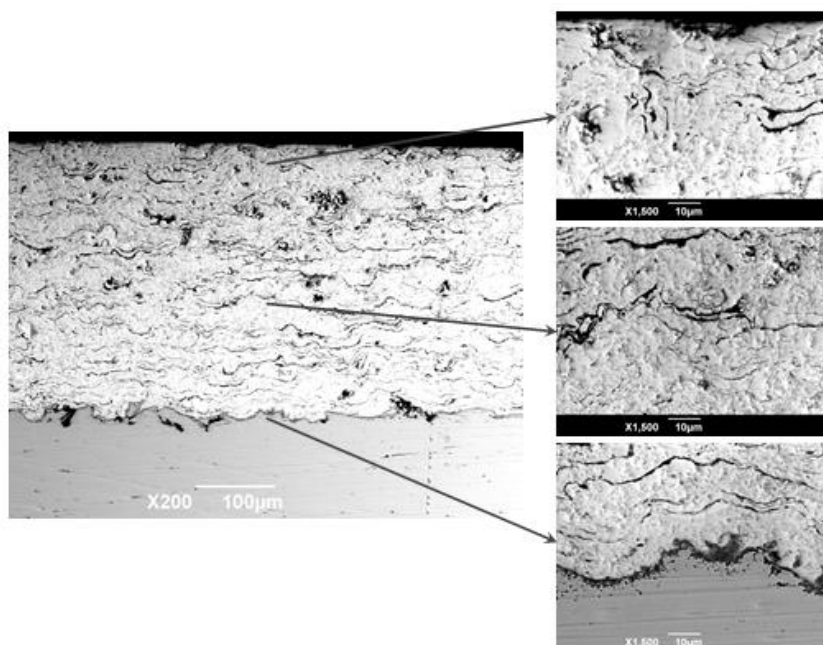
Рентгендік құрылымдық талдау негізінде жасарғаннан кейін цирконий қаттылығының жоғарылауы  $t\text{-ZrO}_2$  фазасының тетрагональдылығының жоғарылауымен байланысты деп айтуға болады. Тетрагональды фазаның тетрагональдылық дәрежесі неғұрлым жоғары болса, материалдың беріктігі соғұрлым жоғары болады [278].



a) жылулық өңдеуге дейінгі b) 900 °C c) 1000 °C d) 1100 °C

Сурет 31 - Цирконий оксидінің рентгендік дифрактограммасы

32-суретте құрылымдық әсерге негізделген 1000 °C температурада жылулық экстракция қамтамасыз етілмегенін көруге болады. Дегенмен, жұқа қабаттар түріндегі микро үздіксіздіктердің саны мен өлшемдерінің ұлғаюы байқалады. Бұл операцияға байланысты ішкі кернеулерді азайтуға көмектеседі. Жіңішке аралық қабаттар түріндегі микро үздіксіздіктердің қалыптасуы жабынның микроқаттылығы мен наноқаттылығы туралы мәліметтердің қатты сәйкес келмеуінің себебі болып табылады [276 б. 79].



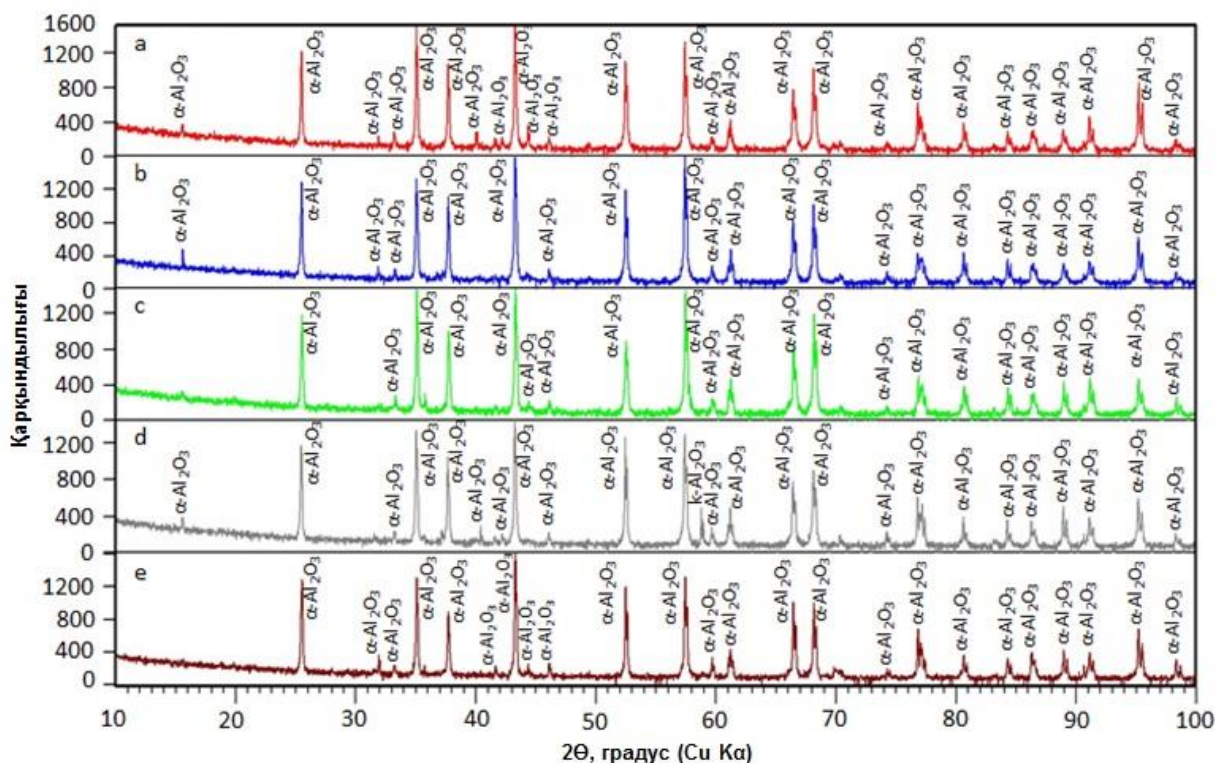
Сурет 32 - 1000 °С жылулық өңдеуден кейінгі цирконий оксидінен жасалған жабынның РЭМ-суреті

#### Кесте 8 - Наноиндентрлеу нәтижелері

| Жабындар   | Наноқаттылық,<br>ГПа | Юнг модулы,<br>ГПа | Вакуум,<br>Па        |
|--|----------------------|--------------------|----------------------|
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> бастапқы                              | 10.7                 | 186                | 3.6*10 <sup>-4</sup> |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> жабынын 500 °С<br>күйдіргеннен кейін  | 14.3                 | 224                |                      |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> жабынын 700 °С<br>күйдіргеннен кейін  | 15.5                 | 286                |                      |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> жабынын 800 °С<br>күйдіргеннен кейін  | 15.9                 | 238                |                      |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> жабынын 1200 °С<br>күйдіргеннен кейін | 20.8                 | 297                |                      |
| ZrO <sub>2</sub> бастапқы  | 9.9                  | 176                | 1.7*10 <sup>-3</sup> |
| ZrO <sub>2</sub> жабынын 900 °С<br>күйдіргеннен кейін                | 11.6                 | 178                |                      |
| ZrO <sub>2</sub> жабынын 1000 °С<br>күйдіргеннен кейін               | 15.8                 | 245                |                      |
| ZrO <sub>2</sub> жабынын 1100 °С<br>күйдіргеннен кейін               | 12.8                 | 174                |                      |

33-суретте алюминий оксиді ұнтағын 500°С, 700°С, 800°С, 1200°С температураларда жеке-жеке 1 сағаттан пеште ұстап, оған рентген-фазалық талдаудың нәтижесі бейнеленген, бұл зерттеудегі мақсатымыз жабынды алмас

бұрын ұнтаққа температура қалай әсер ететінін білу маңызды болды, зерттеу нәтижесі алюминий оксиді ұнтағы бастапқы күйіндегі өзінің  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  негізіндегі гексагоналды торлы күйін, температура көтеріліп максимум  $1200\text{ }^\circ\text{C}$  жеткенде өзгертпей сақтайтыны анықталды (33 а-е суреттер).

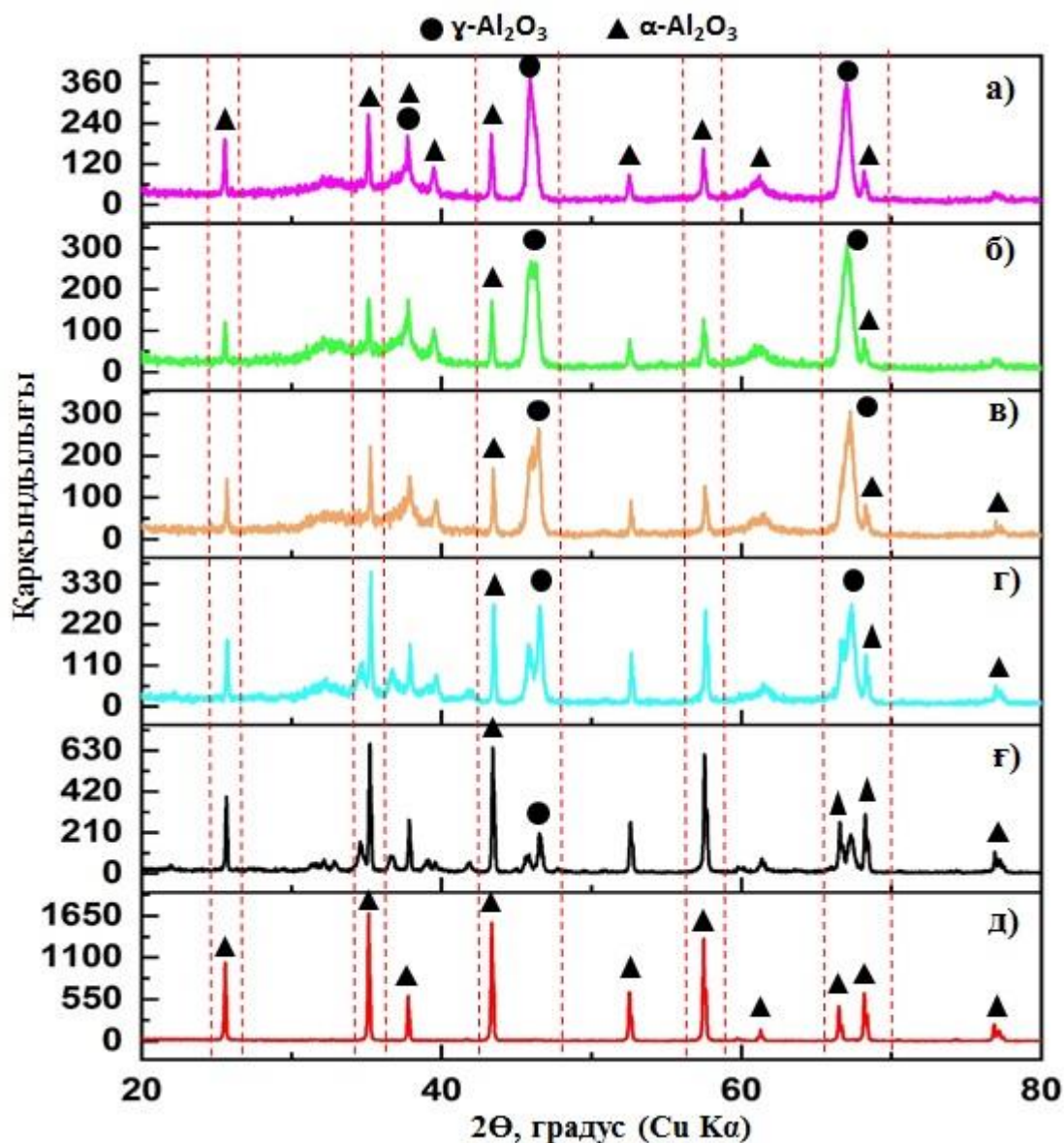


а)  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ұнтағы бастапқы б)  $500\text{ }^\circ\text{C}$  (1 сағат), с)  $700\text{ }^\circ\text{C}$  (1 сағат), d)  $800\text{ }^\circ\text{C}$  (1 сағат), e)  $1200\text{ }^\circ\text{C}$  (1 сағат)

Сурет 33 -  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ұнтағының бастапқы күйдегі және әртүрлі температурада жылулық өндеуден кейінгі дифрактограммасы

[279, 280] жұмыстарда  $\text{Al}_2\text{O}_3$  негізіндегі ұнтақ жоғары температура әсерінен бірнеше модификацияға қабілетті екендігі айтылды. Сонымен қатар, жылулық инъекция кезінде  $\text{Al}_2\text{O}_3$  жабынының құрамы  $\alpha$  және  $\gamma$  фазалардың түзілуі басым болатын әртүрлі фазаларды құрайды. Бұл фазалар бастапқы материалдың табиғатына және балку мен қату температурасына байланысты екендігі көрсетілген. R-3с (34,а сурет) детонациялық тозаңдауден кейін алюминий жабынының дифрактограмма сызығына қарап негізі  $\gamma$ -кубтық тордан және  $\alpha$ -гексагоналды тордан тұратындығын көреміз.  $800\text{ }^\circ\text{C}$  және  $900\text{ }^\circ\text{C}$  кезінде 1 сағат жылулық өндеуден кейін  $\alpha$ -фаза сызығында (34,б және 34,в суреттер) айтарлықтай өзгергіске ұшырамады, және  $\theta$ -(040) фаза дифрактограммасы сызығының максималды кеңеюі  $2\theta = 46\text{ }^\circ$  кезінде байқалды. Келесі үлгіні  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  температурада 1 сағат жылулық өндеу кезінде (34,г-сурет)  $\gamma$ -фазаның сызықтарының қарқындылығы төмендеп  $\alpha$ -фазаның сызықтарының қарқындылығы (көлемдік үлесі) өсіп 71%-ға дейін жеткенін көруге болады (Powder Cell және HighScore Plus программалар көмегімен

диффрактограммаларды сандық талдау көмегімен жүзеге асырылды), 1100 °С-та жылулық өңдеуден кейін  $\alpha$ -фазаның сызықтарының қарқындылығы (көлемдік үлесі) өсіп 87%-ға дейін жетті (34,ғ сурет), келесі үлгіні 1200°С-та жылулық өңдеуден кейін (34,д сурет) жабынның фазалық құрамы толығымен  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ -ке айналғанын көруге болады.  $\alpha$ -фазаның көлемдік үлесінің артуы қаттылықтың жоғарылауына әсерін тигізді. Алынған жабындардың физика-механикалық қасиеттерін жылулық өңдеу арқылы арттыруға мүмкіндік туды [274 б. 10].

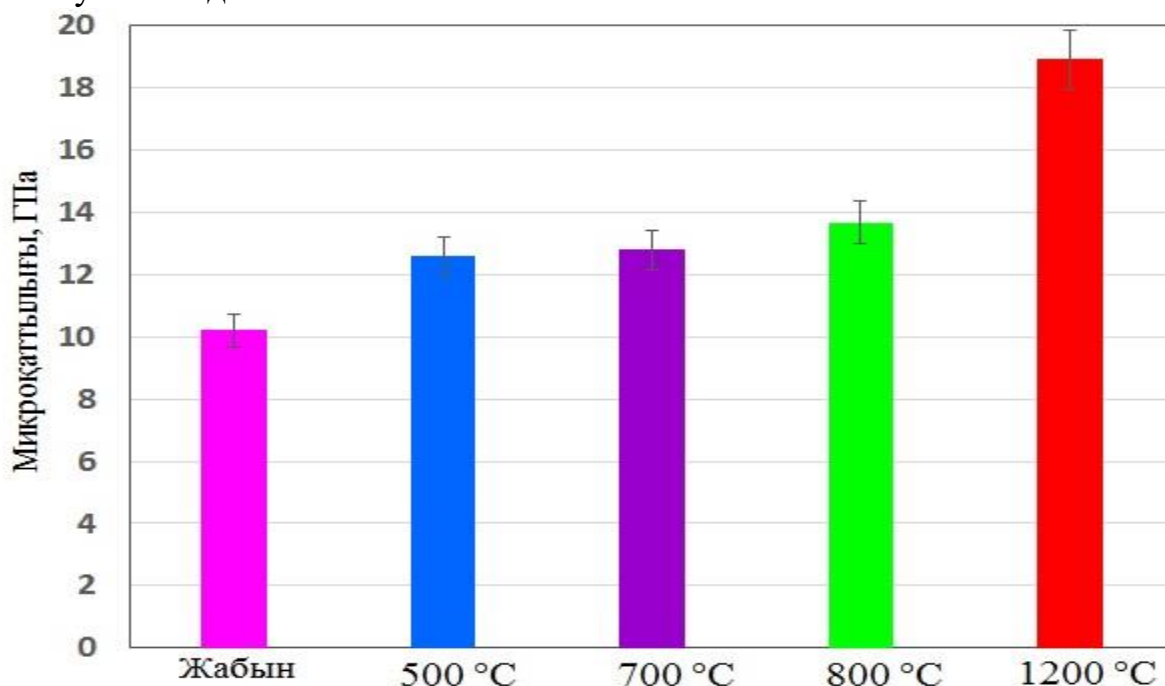


а)  $\text{Al}_2\text{O}_3$  жабыны б) 800 °С в) 900 °С г) 1000 °С ғ) 1100 °С д) 1200 °С

Сурет 34 -  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ұнтағының бастапқы және жабын күйінде әртүрлі температурада жылулық өңдеуден кейінгі диффрактограммасы

35-суретте алюминий оксиді жабынын жылулық өңдеуден кейін беткі қабатынан микроқаттылықты өлшеу нәтижесі бейнеленген, бастапқы күйінде жабын жылулық өңдеуге дейін 10.2 ГПа-ды, жалғасты жеке-жеке жылулық

өндеуден өткен үлгілер 500°С-та 12.6 ГПа-ды, 700°С-та 12.8 ГПа-ды, 800°С-та 13.67 ГПа-ды және 1200°С-та 18.92 ГПа-ды көрсетті. Бұның себебі жылулық өндеудің әсерінде детонациялық тозаңдаудан кейін қалыптасқан жабынның құрамындағы  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  фазаның көлемдік үлесінің артуынан екендігін көреміз. бұны жоғарыдағы 34-суреттегі рентген-фазалық талдау нәтижесіненде нақты көз жеткізуге болады.



Сурет 35 - Жабынды жылулық өндеуден кейінгі бетінен түсірілген микроқаттылықтың нәтижесі

Жылулық өңдеу арқылы алюминий оксиді жабынының көп мөлшердегі  $\gamma$ -фазалы күйінен  $\alpha$ -фазалы күйге алмасты, нәтижесінде наноқаттылығының, Юнг модульнің айтарлықтай артты, біз бұл алынған зерттеу нәтижелерін сараптай отрып, қосымша жоғары температуралық жылулық өндеудің жабынның фазалық алмасуына және механикалық сипаттамаларының жақсаруына оң әсері барына көз жеткізілді, сондықтан жылулық әсер ету қуаты әдеттегі жылулық өндеу пештерінен бірнеше есеге жоғары саналатын ауа плазмалық өндеудің алюминий оксиді жабынының құрылым-фазалық және трибологиялық қасиетіне әсерін бағалау қызығушылық тудырды.

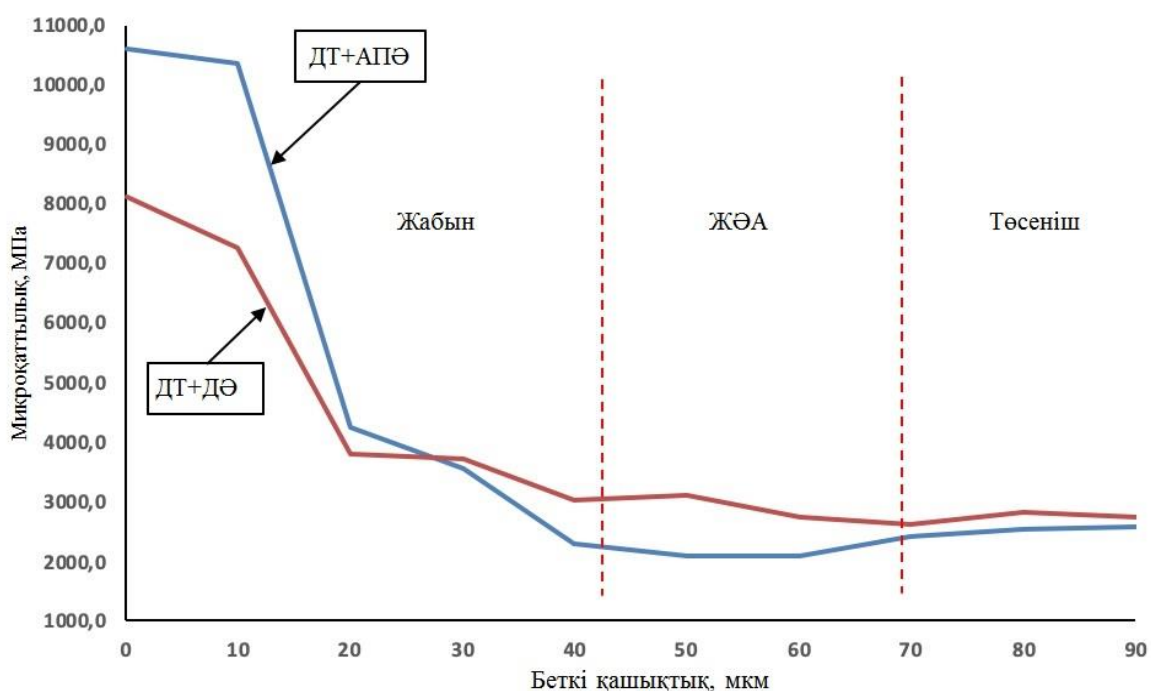
### 3.3 $\text{Al}_2\text{O}_3$ негізіндегі жабынның механикотрибологиялық қасиеті мен фазаалық құрамына детонациялық және ауа плазмалық өндеудің әсері

Функционалды-градиенттік жабындарды алудың екінші әдісі  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  негізіндегі жабындарды детонациялық әдіспен тозаңдату және ауа-плазмалық қондырғыда одан әрі плазмалық беріктендіру арқылы құрамдастырылған әдіс болып табылады. 9 кестеде  $\text{Al}_2\text{O}_3$  негізінде функционалды-градиенттік жабындарды алу режимдері көрсетілген.

Кесте 9 –  $Al_2O_3$  функционалды-градиенттік жабындарды алудың технологиялық параметрлері

| Жабын                                      | Қатынасы $O_2/C_2H_2$ | Оқпаны толтыру көлемі, % | Тозаңдату қашықтығы, мм | Ату саны | Ату жиілігі, с |
|--|-----------------------|--------------------------|-------------------------|----------|----------------|
| Детонациялық тозаңдану                     | 1,856                 | 63                       | 250                     | 20       | 1-0,25         |
| Детонациялық тозаңдану / детонациялық әсер | 1,856 / 1900          | 63 / 80                  | 250                     | 20       | 1 / 0,25       |
| ДТ/АПӨ                                     | 1,856                 | 63                       | 250                     | 20       | 1              |

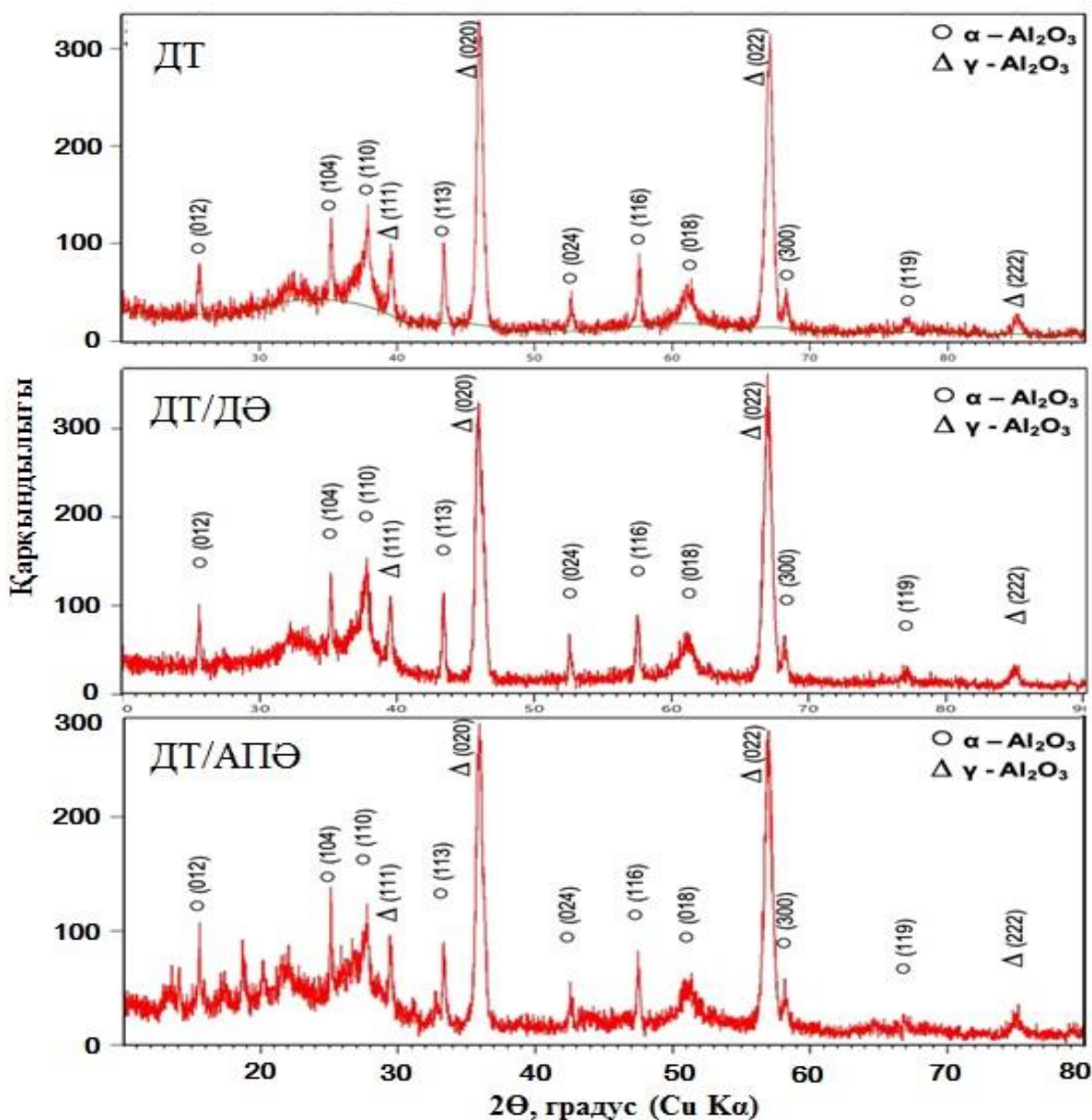
36-суретте детонациялық және ауа-плазмалық әсермен өңделген  $Al_2O_3$  қаптамасы бар үлгілердің тереңдігі бойынша микроқаттылықты бөлудің салыстырмалы кестесі келтірілген. Өңделген жабындар жалпы алғанда бастапқы жабынмен салыстырғанда жоғары микроқаттылығымен сипатталады. Жоғары қаттылық қабаттың бетінде байқалады және қабаттың бетіне жақындауына қарай қаттылық азаяды [276 б. 80].



Сурет 36 –  $Al_2O_3$  жабын тереңдігі бойынша қаттылықты бөлу кестесі

37-суретте құрамдастырылған әдіспен алынған алюминий оксиді негізіндегі жабынның дифрактограммасы көрсетілген. Детонациялық және ауа-плазмалық әсермен өңдегеннен кейін  $\alpha-Al_2O_3$  рефлекстерінің қарқындылығы жоғарылағаны байқалады.

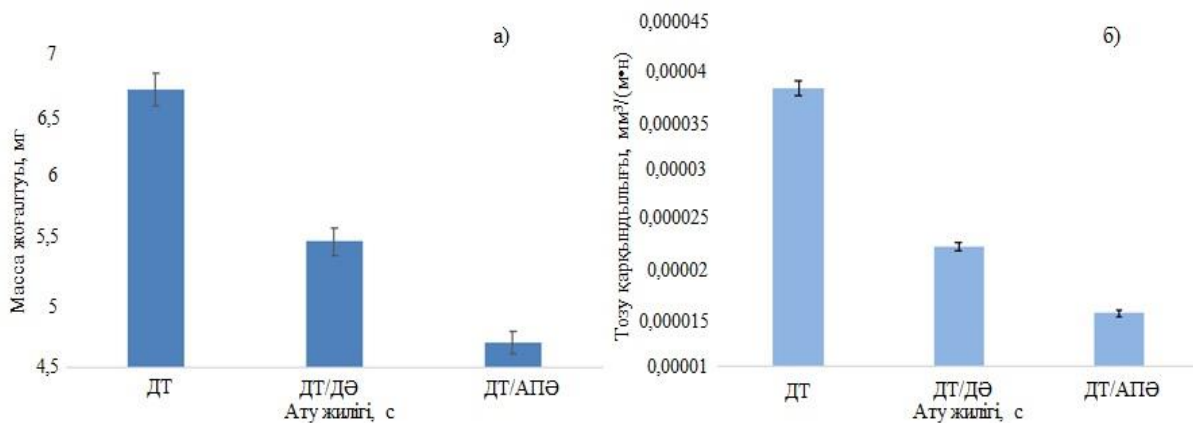




а - беріктенгенге дейінгі детонациялық жабындар, б - детонациялық кейінгі детонациялық әсерден кейінгі жабындар, в-плазмалық әсерден кейінгі детонациялық жабындар

Сурет 37 – Жабындардың диффрактограммалары

38-суретте құрамдастырылған әдіспен алынған алюминий оксиді негізіндегі жабындарды трибологиялық сынау нәтижелері көрсетілген. Суреттен детонациялық және ауа-плазмалық әсерден кейін тозу қарқындылығы азаяды, сондай-ақ абразивті тозуға сынаудан кейін массаның жоғалуы көрінеді. Бұл жабындардың тозуға төзімділігін арттырады. Бұл ретте трибологиялық қасиеттердің жоғары көрсеткіштері ауа-плазмалық тоздандумен өңделген жабындарда анықталды [281].

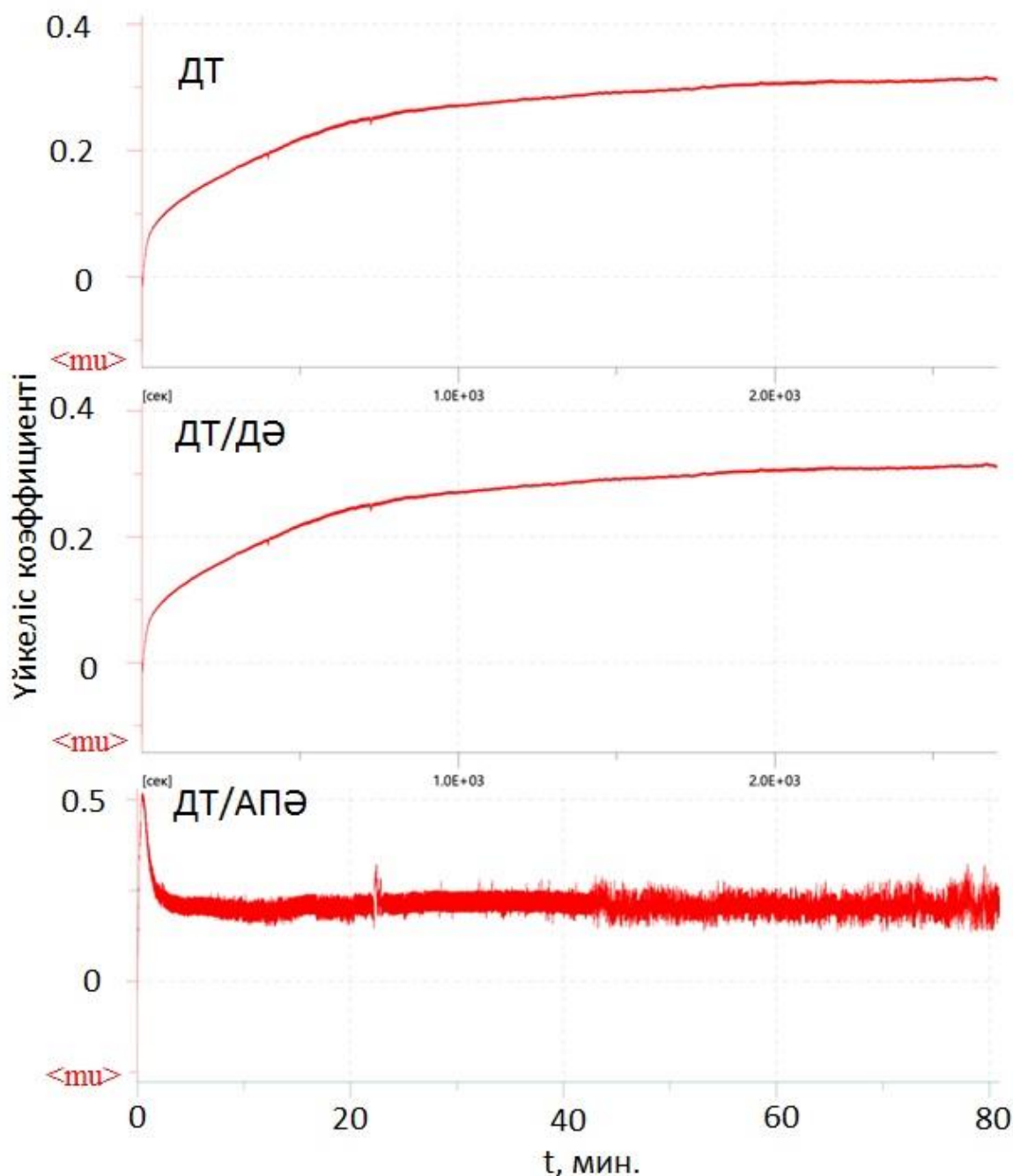


а) шар-дискі схемасы бойынша

б) абразивті тозуға сынау

Сурет 38 –Жабынды трибологиялық сынау нәтижелері

39-суретте үйкеліс коэффициентінің қисықтары келтірілген. Суретте детонациялық және ауа-плазмалық әсермен өңдеу үйкеліс коэффициентінің төмендеуіне әкеледі. Үйкеліс коэффициентінің төмендеуі алюминий оксиді негізіндегі жабындардың тозуға төзімділігіне оң әсер етеді.



Сурет 39 – Тозандаудың әртүрлі режимдерінде алынған  $Al_2O_3$  жабындарының үйкеліс коэффициентінің қисықтары

10-кестеде  $Al_2O_3$  жабындарының құрылымы мен трибологиялық сипаттамалары туралы экспериментальды деректер беріктендіруге дейін және одан кейін. Алынған мәліметтер концентрацияланған энергия ағындарының әсер етуі арқылы алюминий оксидінің негізіндегі жабынның трибологиялық сипаттамаларын арттыруға болатынын куәландырады. Бұл ретте ең үлкен әсер ауа-плазмалық өңдеуден кейін байқалады. Детонациялық тозандаудан кейін  $\gamma-Al_2O_3$  мөлшері мөлшермен 76%, детонациялық әсерден кейін 65 %-ға дейін азайғанын,  $\alpha-Al_2O_3$  фазаның мөлшері керісінше артқанын, ал жабынды ауа плазмалық әсерден кейін  $\gamma-Al_2O_3$  фаза 62%-ға дейін азайып,  $\alpha-Al_2O_3$ -фаза

мөлшері 38%-ға өскенін көреміз, нәтижесінде ауа плазмалық тозаңдаудан кейін абразивті тозуы ең мәнге ие болды, тозу қарқындылығы детонациялық тозаңдаудан кейінгі жабынмен салыстырғанда 2 есеге аз екенін көреміз, бұл нәтиже үйкеліс коэффициентінің мәніненде нақты көрінді, Трибологиялық сипаттамалардың жоғарылау себептері негізінен  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  көлемдік үлесінің ұлғаюына байланысты [281].

Кесте 10 – Беріктендіруге дейінгі және одан кейінгі  $\text{Al}_2\text{O}_3$  жабындыларының эксперименттік деректері

| Жабын  | Фазалық құрамы   | Салмақ жоғалту (абразивті тозуға төзімділік), мг | Тозу қарқындылығы, $\text{мм}^3/(\text{м}\cdot\text{Н})$ | Үйкеліс коэффициенті |
|--------|--|--|--|----------------------|
| ДТ     | $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ (76%) және $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (24%) | 6,7  | $3,83\cdot 10^{-5}$                                      | 0,42                 |
| ДТ/ДӨ  | $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ (65%) және $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (35%) | 5,5  | $2,21\cdot 10^{-5}$                                      | 0,31                 |
| ДТ/АПӨ | $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ (62%) және $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (38%) | 4,7  | $1,53\cdot 10^{-5}$                                      | 0,23                 |

### Бөлім бойынша қорытынды

Детонациялық тозаңдату әдісімен  $\text{Al}_2\text{O}_3$  негізіндегі жабын алынып, оны  $\text{ZrO}_2$  негізіндегі жабынның қасиеттерімен салыстыра отрып, олардың құрылым-фазалық және трибомеханикалық қасиеттерін, сондай-ақ жабынға жылулық өңдеудің әсері зерттелініп, келесідей қорытынды жасалды:

Зерттеулердің теориялық және эксперименттік нәтижелері  $\text{Al}_2\text{O}_3$  және  $\text{ZrO}_2$  негізінде қорғаныс жабындарын құру мәселесін шешудегі жаңа қадам болып табылады, олардың құрылымдық-фазалық сипаттамалары жоғары температурада, жүктемелерде және тозу қарқынында жұмыс істейтін әртүрлі бөлшектердің өнімділігін арттыруға мүмкіндік береді.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  және  $\text{ZrO}_2$  ұнтақтарын детонациялық әдіс көмегімен 12X18H10T болаттың бетін тозаңдандыру нәтижесінде механикалық қасиеттері едәуір жақсарды, сол уақытта  $\text{Al}_2\text{O}_3$  оксидті жабынының қалыңдығы 250-ден 1100 мкм-ге дейін ұлғайған кезде, микроқаттылық 3 есе артты.  $\text{ZrO}_2$  оксиді негізіндегі жабындардың қалыңдығы 250-ден 1000 мкм-ге дейін жоғарылағаны, ал микроқаттылықтың айтарлықтай өзгермегені атап өтілді.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  тозаңдау процесінде кубтық және гексагоналды кристалды торлармен екі фазалы

құрылым қалыптасады, ал  $ZrO_2$ -де тетрагональды торлы бір фазалы құрылым пайда болады. Қалыңдығы 500 мкм  $ZrO_2$  жабыны үшін үйкеліс коэффициентінің тіркелген орташа мәні бірдей қалыңдықтағы  $Al_2O_3$  жабыны үшін тіркелген мәннен 2 есеге төмен екені анықталды. Төсеніш материалмен салыстырғанда жабындардың трибологиялық қасиеті айтарлықтай жақсаруы байқалды.

Жабынды рентген-фазалық талдау  $Al_2O_3$  ұнтағын детонациялық тозаңдаудан кейін  $\alpha-Al_2O_3$  және жартылай  $\gamma-Al_2O_3$  фазалы күйге ауысатыны анықталды.  $Al_2O_3$  жабынын цирконий оксидімен және төсеніш материалымен салыстырып трибологиялық қасиетін зерттеу нәтижесі төсенішке қарағанда жабындардың тозуға берік екендігі үйкеліс коэффициентінің мәнімен анықталды. Бізбен алынған жабындардың тозуға төзімділігі төсеніш материалымен салыстырғанда 1.5-2.5 есеге жоғары болды. Сондай-ақ микроқаттылықтың мәні алюминий оксиді жабыны үшін ең жоғары мән 11.08 ГПа-ды көрсетіп, төсеніш материалымен салыстырғанда микроқаттылығы 2-3.5 есе артты. Төсеніш материалмен салыстырғанда 3-4 есеге коррозияға тұрақты екені анықталды. Қалыңдығы 360–370 мкм болатын цирконий оксидінің жабындары алынды. Металлографиялық талдау әдісімен жабындардың кеуектері бар және орташа кеуек өлшемі 5 мкм-ді құрады. Электрондық микроскопиялық талдау нәтижесінде алынған жабындар жоғары тығыздық пен біркелкі болуымен, сонымен қатар жеке кеуектердің болуымен сипатталатынын көрсетті. Кеуектердің екі тобы анықталды: өлшемі бірнеше микрометрлік дөңгелек микроқуыстар және өлшемі ұзындығы бірнеше ондаған микрометр және қалыңдығы 0,3–1,0 мкм болатын жұқа аралық қабаттар түріндегі микроқуыстар. Қыздырудан кейін жұқа қабаттар түріндегі микроқуыстардың саны мен мөлшерінің ұлғаюы байқалады. Жылулық өңдеуден кейін алюминий оксиді жабынының микроқаттылығы бастапқы өңделмеген күйімен салыстырғанда 1200 °С-та 20.7 ГПа көрсетті. Жабынды жылулық өңдеу кезінде қаттылықтың жоғарылауы  $\alpha-Al_2O_3$  үлесінің артуымен байланысты болуы мүмкін. Рентгендік дифракциялық талдау қыздыруға дейінгі және кейінгі жабындардың фазалық құрамы  $t-ZrO_2$ -ден тұратынын көрсетті. Қыздырудан кейін  $t-ZrO_2$  тетрагональдық дәрежесінің жоғарылауы байқалады. Цирконий оксиді жабындарының микроқаттылығы күйдіру температурасына байланысты 10-25 % жоғарылайтыны анықталды. Наноиндентация нәтижелері 1000 °С күйдіруден кейін жабындардың наноқаттылығы 50%-ға артып, 15,8 ГПа дейін жететінін көрсетті. 900–1100 °С жылулық өңдеуден кейін цирконий диоксидінің қаттылығының жоғарылауы  $t-ZrO_2$  фазасының тетрагональдылығының жоғары дәрежесімен байланысты екені анықталды.

Алынған  $Al_2O_3$  оксиді негізіндегі жабынға детонациялық әсер етуден кейін үйкеліс коэффициентінің мәні 0.42 ден 0.31-ге азайғанын, ауа плазмалық өңдеуден кейін 0.23-ке дейін азайғаны, ал абразивті тозуға қарқындылығы ауа плазмалық өңдеуден кейін 2 есеге азайғаны анықталды, бұндағы себеп:  $\alpha-Al_2O_3$  фазаның көлемдік үлесі детонациялық жабында 24% көрсетсе, ауа плазмалық әсерден кейін оның көлемі 38%-ды құрауынан, сондай-ақ ауа плазмалық өңдеу өте жоғары температурада өтетін процес болғандықтан,  $\alpha-Al_2O_3$  фазаның

бөлшектері еріп бірігуі және қуыстардың азаюының әсерінен деп болжауға болады.

Біз бұдан детонациялық тозаңдау арқылы  $Al_2O_3$  оксиді негізіндегі жабынның фазалық құрамына өзгеріс тудыра алатындығымызды түсіндік және трибологиялық, механикалық көрсеткіштері төсеніш материалымен және цирконий оксиді жабынымен салыстырғанда жоғарлағанын, қосымша жылулық өңдеудің, детонациялық әсердің және ауа плазмалық әсердің механикалық қасиетті арттыратынына көз жеткіздік, алайда біздің ойымызша бұл қосымша өңдеулер жоғары температурада өтетіндіктен қосымша энергияны шығынды талап етеді, бұл экономикалық жақтан тиімсіз, екіншіден қосымша өңдеу жабын материалы үшін қауіпті, беттік жарылулар (микротрещина) бүлінулер тудыру мүмкін. Сол себепті біз ары қарай детонациялық тозаңдау параметрлерінің алюминий оксиді негізіндегі жабынның құрылым-фазалық күйіне және механотрибологиялық қасиеттеріне әсерін зерттеуді жөн деп есептеп келесі тараудағыдай зерттеулерді жүргіздік.

## 4 ДЕТОНАЦИЯЛЫҚ ТОЗАҢДАНУ РЕЖИМІНІҢ ФАЗАЛЫҚ ҚҰРАМҒА ЖӘНЕ $Al_2O_3$ ЖАБЫНДЫЛАРЫНЫҢ ТРИБОЛОГИЯЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІНЕ ӘСЕРІ

### 4.1 Ату жиілігінің $Al_2O_3$ детонациялық жабынының фазалық құрамы мен трибомеханикалық қасиеттеріне әсері

Машина жасау техникасының жұмыс элементтері мен инженерлік жабдықтарының конструкциясын пайдалану жағдайларын қатайту және күрделендіру қорғаныс құралдарын жасауды талап етеді. Машина жасау бұйымдарының көпшілігі әртүрлі класты болаттан жасалған, бұл ретте агрессивті сыртқы әсер ететін факторлардан Қорғаныс функционалдық жабындарды салу және беттің модификациясы есебінен қамтамасыз етіледі, бұл экономикалық мақсатқа сай болып табылады [282,283]. Соңғы уақытта жоғары өнімділігімен, әмбебаптығымен, автоматтандырудағы қарапайымдылығымен, жабылатын беттердің өлшемдерінің шексіз болуымен сипатталатын жоғары жылдамдықты жабынды тозаңдату технологияларына үлкен қызығушылық байқалады. Жоғары жылдамдықты тозаңдату тәсілдері бөлшектерді тозудан және коррозиядан қорғау үшін пайдаланылатын жабындарды дәстүрлі газожылулық тозаңдандыру мүмкіндігін едәуір кеңейтуге мүмкіндік береді [284,285]. Жабындарды алудың газжылулық жоғары жылдамдықты тәсілдеріне детонациялық [286], дыбыстан жоғары ауа-газды плазмалық (ДЖАГП) [287] және дыбыстан жоғары газ жалынды (HVOF) тозаңдату әдістері жатады. Олардың арасында детонациялық тозаңдану болашағы бар болып табылады. Детонациялық тозаңдату жарылғыш газ қоспасымен толтырылған арнайы детонациялық оқпанның көмегімен жүзеге асырылатын жабындарды газожылулық тозаңдату әдістерінің бірі болып табылады. Жабынды қалыптастыру үшін ұнтақ тәрізді тозаңданатын материал қолданылады. Детонация процесінде ұнтақ бөлшектерінің жоғары жылдамдыққа (1000 м/с) дейін үдеуі, олардың балқуы және тозаңданатын бетке тұндыру жүреді. Бұл ретте композициялық керамикалық, металлокерамикалық, биокерамикалық жабындарды жабуға ерекше көңіл бөлінеді. Жабындардың төмен кеуектілігі және қаптамадағы бастапқы ұнтақтың химиялық құрамын сақтау, сондай-ақ жабындардың ілінісу жоғары беріктігі арқасында детонациялық әдіс  $Al_2O_3$  негізінде жабындарды алу үшін болашағы бар болып табылады. Алюминий оксиді  $Al_2O_3$ , бірқатар оң қасиеттерге ие екені белгілі, қаттылық, тозуға төзімділік, коррозияға төзімділік, үйкеліс коэффициенті, сондай-ақ металдардағы түйіршіктердің өсу ингибиторы болып табылады [288]. Алюминий оксидінен жасалған жабынның фазалық құрамы жағу тәсіліне, технологиялық параметрлерге, төсем температурасына, тозаңданатын бөлшектердің мөлшеріне және басқа да бірқатар факторларға байланысты. Дәстүрлі түрде бұл жабындарды газплазмалық, плазмалық немесе детонациялық тәсілмен алады. Корундты ( $\alpha-Al_2O_3$ ) газды жалынмен тозаңдау кезінде алынған жабын іс жүзінде  $\gamma-Al_2O_3$ , ал плазмада және детонациялық жабындарда  $\alpha-Al_2O_3$  (5-10%) және  $\gamma-Al_2O_3$  (90-95%) тұратын екі фазалы жабындар екені белгілі. Алайда,  $\gamma-Al_2O_3 \rightarrow \alpha-Al_2O_3$  фазалық түрленулерінің

кезектілігі және аралық модификациялар туралы әдебиеттердегі деректер кейде бір-біріне қайшы келеді [289]. Сондықтан алюминий оксидінің детонациялық жабындысының фазалық құрамын болжау мүмкін болмады. Сонымен қатар, детонациялық ұнтақты жабындардың қасиеттері, басқа тәсілдермен орындалған жабындар сияқты, көптеген факторларға, атап айтқанда тозаңдату режимдеріне байланысты. Сондықтан  $Al_2O_3$  негізінде детонациялық жабындардың құрылымы мен қасиеттерін қалыптастыру ерекшеліктерін зерттеу үлкен қызығушылық тудырады.

Ату жиілігін өзгерту арқылы  $Al_2O_3$  жабыны алынды. 11-кестеде  $Al_2O_3$  жабынның детонациялық тозаңдауының технологиялық параметрлері көрсетілген [290].

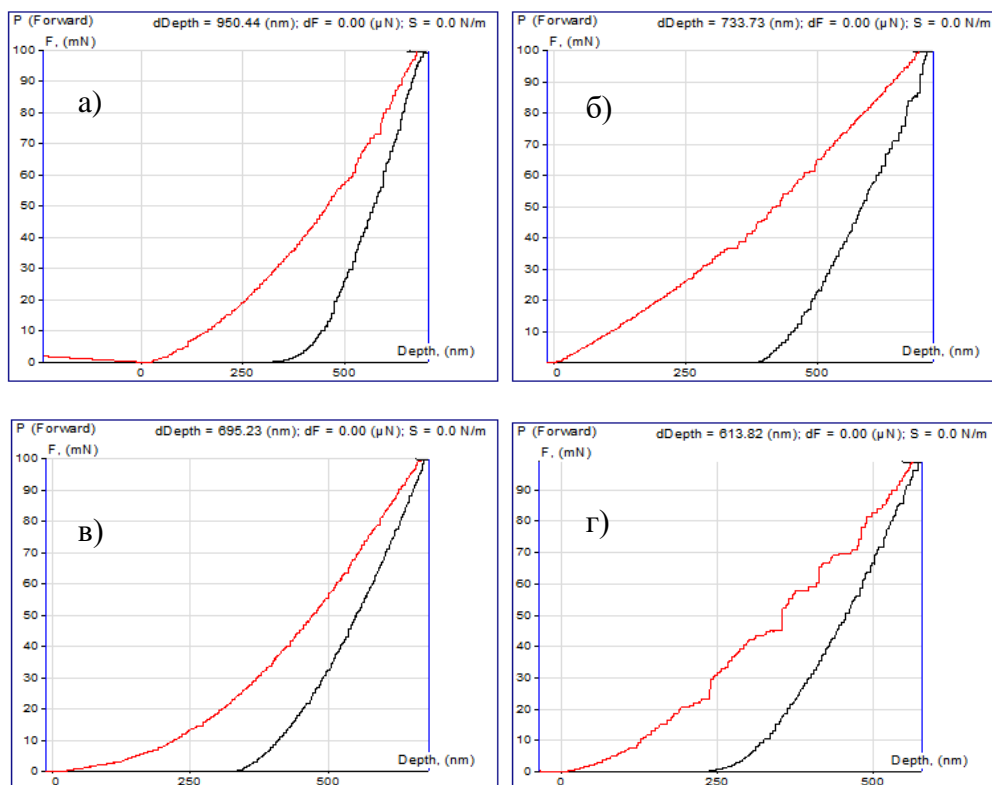
Кесте 11 –  $Al_2O_3$  жабындарының детонациялық тозаңдауының технологиялық параметрлері

| Үлгі нөмірі | Қатынасы $O_2/C_2H_2$ | Оқпан толтыру көлемі, % | Тоzaңдату қашықтығы, мм | Ату саны | Ату арасындағы кідіріс уақыты, с |
|-------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|----------|----------------------------------|
| 1           | 1,856                 | 63                      | 250                     | 20       | 1                                |
| 2           |                       |                         |                         |          | 0,75                             |
| 3           |                       |                         |                         |          | 0,5                              |
| 4           |                       |                         |                         |          | 0,25                             |

Жоғары дәлдіктегі газ тарату жүйесінің яғни компьютер көмегімен детонациялық оқпанының ішіне газ толтырылған, жұмыс процессі тасымалдаушы газбен толтырудан басталады. Осыдан кейін жарылғыш қоспаның зарядынан және тасымалдаушы газдан тұратын газ ортасы пайда болатындай белгілі бір бөлігі оқпанға беріледі. Газ тасымалдаушы ағынының көмегімен ұнтақ оқпанға беріледі (компьютермен басқарылатын дозатордың көмегімен) шашырайды және бұлт тәріздес дақты құрайды. Төсеніш оқпаннан белгілі бір қашықтықта орналасқан. Ұнтақтың бір бөлігі берілгеннен кейін компьютер детонацияны бастау үшін сигнал береді. Бұл детонациялық тұтандыру білтесінің көмегімен іске асырылады. Зарядтың жарылу ұзақтығы шамамен 1 мс құрайды, жарылғыш қоспада детонациялық толқын пайда болады, ол газ тасымалдағыштың әсерінде соққы толқынына айналады. Детонация өнімдері (3500-4500 К дейін қыздырылған) және тасымалдаушы газ (1000-1500 к дейін қыздырылған) дыбыстан жоғары жылдамдықпен қозғалады. Газдардың шашыраңқы бөлшектермен өзара әрекеттесу уақыты 2-5 мс құрайды. Бөлшектер жылдамдығы  $800 \text{ мс}^{-1}$  жетуі мүмкін.

Біз наноинденттеу әдісімен жабындардың нанотқырлығын зерттейміз. 40-суретте әр түрлі режимдерде алынған жабындар үшін салыстырмалы наноинденттеу қисықтары келтірілген. Наноиндентордың ену тереңдігі ату жиілігінің азаюымен азаяды.





а) 1 с, б) 0,75 с, в) 0,5 с, г) 0,25 с

Сурет 40 – Әртүрлі тозаңдану режимдерінде алынған  $Al_2O_3$  жабындарына арналған салыстырмалы наноиндентрлеу қисықтары

Серпімділік және нанотақтылық модульдерінің алынған қисық мәндері бойынша есептелген мәндер 12-кестеде келтірілген. Ату жиілігінің азаюымен қаттылық 10,87 ГПа-дан 16,33 ГПа-ға дейін артады. Сондай-ақ, 270,64 ГПа дейін жабындардың серпімділік модулі артты. Серпімділік модулінің ұлғаюы пластикалықтың азаюын және жабындардың беріктігінің артуын көрсетеді. Қаттылықтың жоғарылау себебі, екінші жылулық беріктендірумен байланысты. Себебі, ату жиілігі өзгерген кезде бөлшектердің жылдамдығы мен температурасы өзгермейді, тек тозаңдату процесі кезінде жабынның жағылған қабаттарының температурасы ғана өзгереді. Осылайша, CCDS200 детонациялық кешеннің атулары арасындағы кідіріс уақытын ең аз ықтимал мәніне дейін азайта отырып, қаттылығы 16,33 ГПа және Юнг модулі 270,64 ГПа болатын  $Al_2O_3$  жабынын алуға болады.

Ату жиілігінің азаюы  $Al_2O_3$  жабындарының қаттылығы мен серпімділік модулінің артуына әкеледі деп анықталды. Рентгенқұрылымдық талдау негізінде ату арасындағы кідіріс уақытын азайту кезінде қаттылықтың жоғарылауының негізгі себебі  $\alpha-Al_2O_3$  фазаның көлемдік үлесінің жоғарылауымен байланысты екені анықталды. Рентгенқұрылымдық зерттеулер  $\alpha$ -фазаның ең көп құрамына ие жабынды қалыптастыру шамамен ату жиілігі 0,25 с кезінде қол жеткізетінін көрсетті.

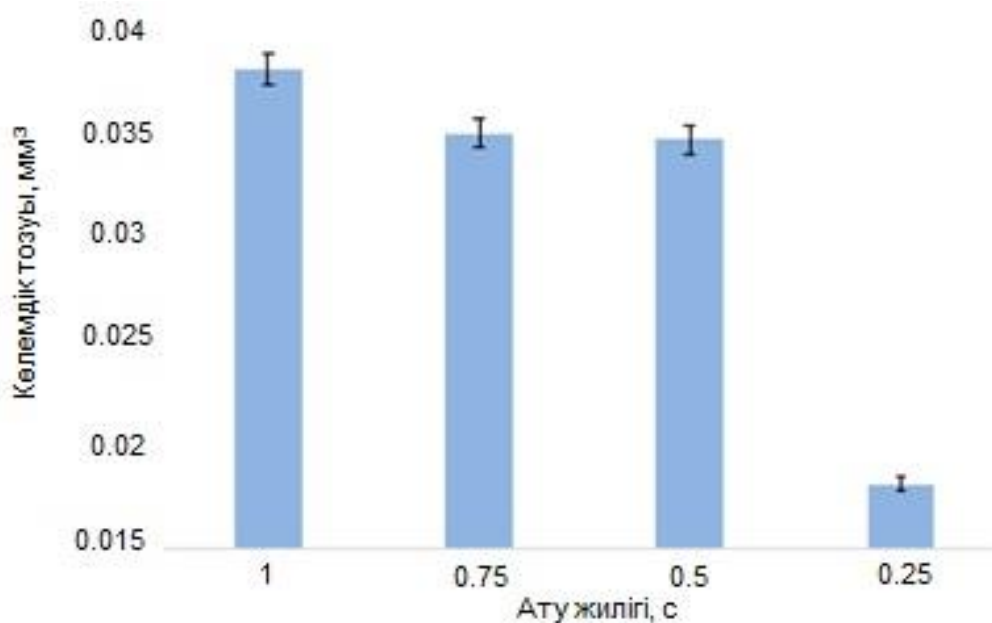
Кестеде келтірілген жалпыланған мәліметтерден тозу қарқындылығы,

қаттылығы және  $Al_2O_3$  жабынының үйкеліс коэффициентінің мәні оның құрылымдық-фазалық жай-күйлеріне тәуелділігі анық байқалады. Ату жиілігі 1 секунд кезінде алынған бірінші, екінші және үшінші қабат жабындарының тозуға төзімділігі ату жиілігі 0,25 секундпен алынған төртінші қабат жабынмен салыстырғанда төмен.  $\gamma-Al_2O_3$  (66%) және  $\alpha-Al_2O_3$  (34%) тұратын жабын жоғары трибологиялық сипаттамаларды көрсетті. Қаттылықтың және тозуға төзімділіктің жоғарылау әсерлері жабынды бетінің қызуы есебінен тозданду процесінде түзілетін  $\alpha-Al_2O_3$  фазаның көлемдік үлесімен тікелей байланысты [291].

Кесте 12 –  $Al_2O_3$  жабындарды наноиндентрлеу нәтижелері

| Ату жиілігі, с | Фаза құрамы  | Наноқаттылық, ГПа | Юнг модулі, ГПа | Үйкеліс коэффициент | Тозу қарқындылығы, $mm^3/(m \cdot H)$ |
|----------------|--|-------------------|-----------------|---------------------|---------------------------------------|
| 1              | $\gamma-Al_2O_3$ (76%) және $\alpha-Al_2O_3$ (24%) | 10,87             | 207,70          | 0,42                | $3,83 \cdot 10^{-5}$                  |
| 0.75           | $\gamma-Al_2O_3$ (70%) және $\alpha-Al_2O_3$ (30%) | 11,03             | 159,97          | 0,48                | $4,16 \cdot 10^{-5}$                  |
| 0.5            | $\gamma-Al_2O_3$ (69%) және $\alpha-Al_2O_3$ (31%) | 11,72             | 206,48          | 0,41                | $3,73 \cdot 10^{-5}$                  |
| 0.25           | $\gamma-Al_2O_3$ (66%) және $\alpha-Al_2O_3$ (34%) | 16,33             | 270,64          | 0,37                | $1,60 \cdot 10^{-5}$                  |

41-суретте "шар-дискі" әдісі бойынша  $Al_2O_3$  жабындарының үлгілерін трибологиялық сынау нәтижелері көрсетілген. Үлгілердің тозуға төзімділігі тозу көлемімен сипатталды. Суреттен 1 сек-тен 0,75 сек-ке дейін және 0,5 сек-ке дейін ату арасындағы кідіріс уақытының азаюынан тозу көлемінің азайғанын көруге болады. Атыстар арасындағы кідіріс уақытының мәні 0,25 сек болған кезде тозу көлемінің айтарлықтай төмендеуі байқалады. Тозу жиегінің азаюы жабындардың тозуға төзімділігінің артуын көрсетеді.



Сурет 41 – Трибологиялық сынақтардың нәтижелері

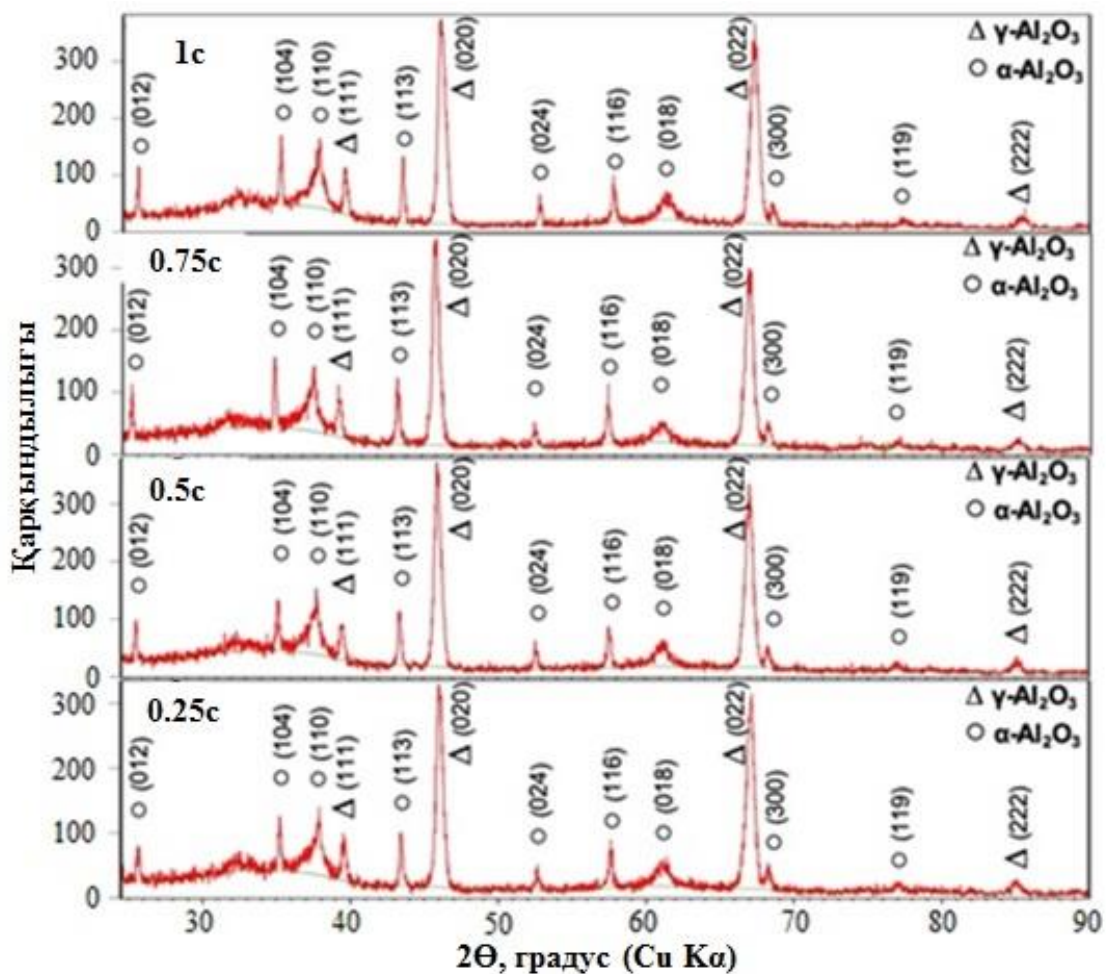
42 – Суретте әр түрлі режимдерде алынған  $Al_2O_3$  жабындыларының дифрактограммалары көрсетілген. Жабындарды рентгенқұрылымдық талдау нәтижелері көрсеткендей, барлық жабындар  $\gamma-Al_2O_3$  және  $\alpha-Al_2O_3$  тұрады. Жартылай сандық талдау нәтижелері бастапқы ұнтақ жабындарда  $\alpha-Al_2O_3$  - тен екеніне қарамастан 65-75%  $\gamma-Al_2O_3$  фазасы тұратынын көрсетті. Бұл жабынды қалыптастыру кезінде, соққы толқынының әсер етуі және жылдам салқындатуы жағдайында  $\alpha-Al_2O_3$ ,  $\gamma-Al_2O_3$  теңсіз қайта кристалдануымен түсіндіріледі.

Дифрактограммадан тоздандуу режиміне байланысты осы фазалардың көлемдік үлесі өзгерісі көрінеді. Ату жиілігінің азаюымен атулар арасында  $\alpha-Al_2O_3$  фазасының үлесі артады. Бұған себеп жабындарды қалыптастыру кезінде бөлшектердің қызуы салдарынан болатын  $\gamma \rightarrow \alpha$  екінші рет қайта кристалдануы. Аралық фазаларда  $\gamma-Al_2O_3$  дан  $\alpha-Al_2O_3$  қайта кристалдануы  $\sim 1100$  °C температурадан басталатыны. Ал біздің жағдайда ату жиілігін 0,25 с дейін азаюы 1100 °C жоғары жабынның жағылған қабатының температурасының артуына алып келеді. Детонациялық тоздандуу әдісінің ату жиілігін азайта отырып, жабынның жағылған қабатын қыздыру үшін қосымша энергия көзі ретінде қолдануға болады. Ату жиілігінің азаюы, жабынның бір-біріне жабысуы кезінде бірлі-жарым бөліктерінде температура біртіндеп жоғарылайды. Сол себепті, егер кейбір бөліктерінде тоздандуу жиілігі бірнеше миллисекундқа тең болса, бүріккен дақтардың жылулық әсері елеулі болады.

Рентгенқұрылымдық талдау негізінде ату жиілігін 0,25 с дейін азайту кезінде қаттылықтың жоғарылауының негізгі себебі  $\alpha-Al_2O_3$  фазаның көлемдік үлесінің жоғарылауымен байланысты деп айтуға болады.  $\alpha$  және  $\gamma$ -фазалардың модификациялары физико-механикалық қасиеттердің әртүрлі мағыналарына ие.  $\alpha-Al_2O_3$  модификациясы жоғары қаттылық пен тозуға төзімділікке ие, ал  $\gamma-Al_2O_3$  салыстырмалы түрде пластикалы және төсенішпен жабысудың (ілінісу)

жоғары беріктігін қамтамасыз етеді [292].

42-суретте тозаңдану кезінде ату жылігін 1С-тан 0.25С-қа дейін азайту арқылы алынған жабынның жеке-жеке рентген дифрактометрлік зерттеу нәтижесі көрсетілген.  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  және  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  фазалардың дифрактограмма сызықтарына қарай отырып, ату жылігін 0.25 С-қа дейін азайту кезінде фазалардың құрамында аздаған өзгерістер болатындығын яғни  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  фазасының рефлекстерінің қарқындылығының біртіндеп жоғарылауы байқалады.

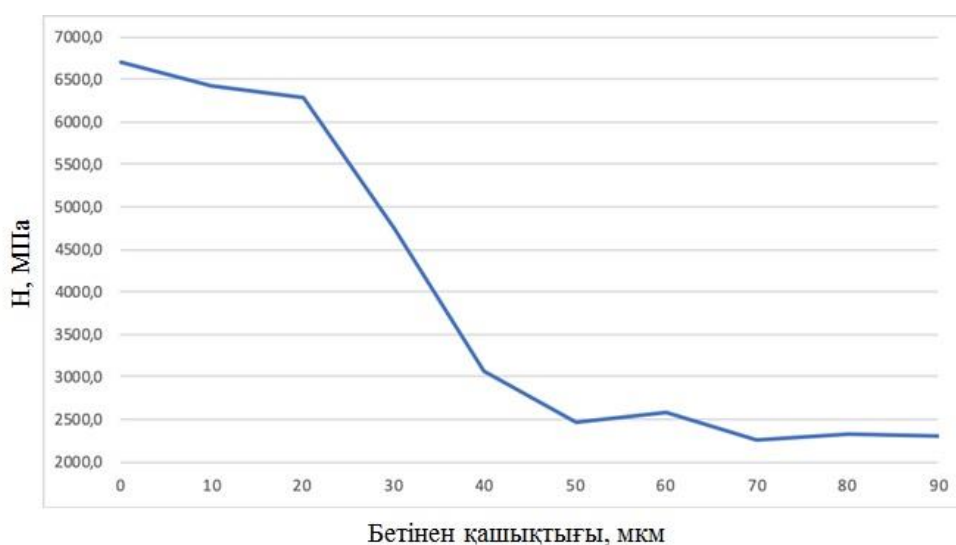


Сурет 42 – Әртүрлі тозаңдану режимдерінде алынған  $\text{Al}_2\text{O}_3$  жабындыларының дифрактограммасы

Алынған нәтижелерді талдау ату арасындағы кідіріс уақытын азайта отырып, жоғары қаттылығы бар  $\text{Al}_2\text{O}_3$  жабынын алуға болады. ССДС200 детонациялық кешені үшін ату арасындағы кідіріс уақытының азаюымен 16,33 ГПа қаттылығы және Юнг модульі 270,64 ГПа болатын  $\text{Al}_2\text{O}_3$  жабыны алынды. Атулар арасындағы кідіріс уақытын 0,25 с дейін азайту кезінде қаттылықтың жоғарылауының негізгі себебі фазаның  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  көлемді үлесінің артуымен байланысты екені анықталды. Рентгенқұрылымдық зерттеулер  $\alpha$ -фазаның ең көп құрамына шамамен 0,25 с ату арасындағы кідіріспен жабынды қалыптастыру кезінде қол жеткізетінін көрсетті.  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  фазасының көлемдік

үлесінің ұлғаюы жабынды қалыптастыру кезінде бөлшектердің қызуы салдарынан болатын  $\gamma \rightarrow \alpha$ , яғни температураның 1100 °C жоғары өсуі салдарынан бір-біріне салғанда жабынның бірлі-жарым дақтарында болады. Осылайша, ату арасындағы кідіріс уақытын өзгерте отырып,  $Al_2O_3$  негізіндегі жабындардың фазалық құрамын және тиісінше жабындардың қасиеттерін басқаруға болады. Алынған нәтижелер одан әрі жоғары адгезиялық беріктігі және жабынды алу кезінде ату арасындағы кідіріс уақытын өзгерту арқылы жабын бетінің жоғары қаттылығы бар градиентті жабындарды алуға мүмкіндік береді. Мұндай жабындарды алу жабындардың үстіңгі қабаты  $\alpha-Al_2O_3$  фазасының көп санынан тұрады, ал  $\gamma-Al_2O_3$  фазасының үлесі төсенішке жақындау шамасына қарай ұлғаяды. Осылайша, тұтқыр  $\gamma-Al_2O_3$  фазасы жабынның және төсеніштің жақсы адгезиялық беріктігін, ал жабынның бетінде көп мөлшерде болатын  $\alpha-Al_2O_3$  фазасы жоғары қаттылық пен тозуға төзімділікті қамтамасыз етеді [290 б. 6].

43-суретте микроқаттылықтың тереңдікке бөлу кестесі келтірілген. Төменде көрсетілген  $Al_2O_3$  градиентті жабынның тереңдігіне микроқаттылықтың тәуелділік графигі жабынның барлық көлемі бойынша микротқырлық біркелкі емес екенін көрсетеді: өтпелі қабатқа жақын жабын, жоғарғы бөлігіне қарағанда микротқырлықтың аз мәніне ие екені көрінеді. Бұл ретте төсеніштен, жабынның бетіне қарай микроқаттылықтың күрт және біркелкі ұлғаюы байқалады [291].



Сурет 43 –  $Al_2O_3$  градиентті жабынының тереңдігі бойынша қаттылықты бөлу кестесі

Бұл зерттеу бөлімінде ату жылігін 1с-тан 0.25с-қа дейін азайту алюминий оксиді жабынын алу көлемдік тозуының азаюын тудыратыны, құрамындағы  $\alpha-Al_2O_3$  фазасының көлемдік үлесінің артуымен байланысты екені анықталды, біз бұл өзгерісті ескере отырып, келесі бөлімде детонациялық оқпанды жарылғыш қоспаға толтыру мөлшерін өзгертудің алюминий оксиді жабынының фазалық өзгерісіне әсерін бақылай отырып, трибологиялық

қасиетке қалай әсер ететіні қызығушылық тудырып, келесі бөлімдегідей зерттеулер жасалынды.

#### **4.2 Детонациялық оқпанды газға толтыру мөлшерінің $Al_2O_3$ жабындарының фазалық құрамына және трибологиялық қасиеттеріне әсері**

Детонациялық жабындар жана буындағы «CCDS2000» (компьютермен басқарылатын детонациялық тозаңдау) компьютерлік детонациялық тозаңдау кешенінде алынды (РАҒ СБ ГДИ, Новосибирск, Ресей) [293, 294]. Оқпан жоғары дәлдіктегі газ тарату жүйесін қолданып газбен толтырылған және оны компьютер басқарады. Процесс оқпанды тасымалдаушы газбен толтырудан басталады. Содан кейін жарылғыш қоспаның белгілі бір бөлігі жарылғыш заряд пен тасымалдаушы газдан тұратын қабатты газ тәрізді орта пайда болатындай етіп тасымалданады. Тасымалдаушы газ ағынының көмегімен ұнтақ бар жарылу аймағына құйылады (компьютермен басқарылатын фидердің көмегімен) және бұлт (тұман) құрайды. Төсеніш оқпаннан белгілі бір қашықтықта орналасады және компьютер жарылысты бастау үшін дыбыстық сигнал береді. Бұл электрлік ұшқынмен жасалады. Зарядтың жарылғыш жануының ұзақтығы шамамен 1 мс құрайды. Жарылғыш қоспада детонациялық толқын пайда болады, ол тасымалдаушы газда соққы толқынына айналады. Детонациялық өнімдер (3500-4500 К дейін қызады) мен тасымалдаушы газ (соққы толқындары арқылы 1000-1500 К дейін қызады) дыбыс жылдамдығынан асатын жылдамдықпен қозғалады. Бөлшектері шашыраңқы газдардың реакция уақыты 2-5 мс. Бөлшектердің жылдамдығы  $800-1200 \text{ мс}^{-1}$  жетуі мүмкін [295]. Жұмыс газдардың шығыны 4 Гц-тен аспайтын орташа ату жиілігінде: ацетилен 4-7; пропан бутан қоспасы 2-3,5; оттегі 10-12; азот 10-15  $\text{м}^3/\text{сағ}$ . азот тасымалдаушы газ ретінде пайдаланылды.

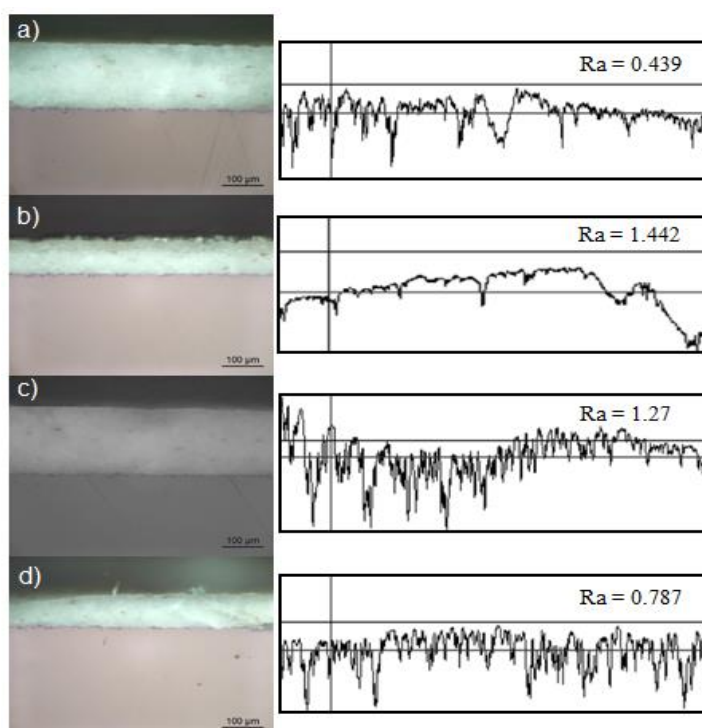
Жабындардың қалыңдығы 180-200 мкм болды. Қалыптасқан жабынның бір өлшемдегі орташа мөлшері 8-10 мкм болды. Әр үлгі 20 рет атылды. Алюминий оксиді жабыны оқпанды түрлі толтыру (53%, 58%, 63%, 68%) көлемімен детонациялық тозаңдау арқылы алынды (Қосымша Б). Қаптаманың кедір-бұдырлығын сипаттайтын негізгі параметр ретінде біз Ra параметрін таңдадық - профильдің орташа арифметикалық ауытқуы. Жану газы ретінде ацетилен-оттегі қоспасын қолдана отырып, әр түрлі толтыру көлемдері үшін  $Al_2O_3$  жабыны алынды. Жарылғыш қоспаның үлесі ұлғайған сайын (баррель көлемінің 53% -дан 68% -ға дейін), бөшке ішіндегі температура жоғарылайды. Сонымен қатар, бөлшектердің төмен жылдамдықтары үшін оттегі/отын қатынасының  $O_2/C_2H_2 = 1.1$ -ден  $O_2/C_2H_2$ -ге дейін өзгеруі жарылғыш қоспаның берілген көлемі үшін температураның жоғарылауына әкелуі мүмкін. Ұнтақ материалының тозаңдау кезінде толық еруін қамтамасыз ету үшін оңтайлы қатынас ретінде  $O_2/C_2H_2 = 1.856$  таңдадық, оқпанды газға толтыру көлемі 53%-дан 68%-ға дейін  $Al_2O_3$  негізіндегі градиентті жабынды алған кезде өзгерді, 13-кестеде технологиялық параметрлердің қолданылуы көрсетілген [296].

Кесте 13 - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> жабынының технологиялық параметрлері

| № | O <sub>2</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> | Оқпанды толтыру көлемі, % | Тозаңдау қашықтығы, mm | Ату саны |
|---|---|---------------------------|------------------------|----------|
| 1 | 1.856   | 53                        | 250                    | 20       |
| 2 | 1.856   | 58                        | 250                    | 20       |
| 3 | 1.856   | 63                        | 250                    | 20       |
| 4 | 1.856   | 68                        | 250                    | 20       |

Трибологиялық зерттеу ASTM G 133-95 және ASTM G99 [297, 298] сәйкес стандартты шарлы дискілік техниканы қолдана отырып, TRB<sup>3</sup> жоғары температуралы трибометрде (Антон Паар Срл, Пезу, Швейцария) жүргізілген құрғақ сырғанау сынақтарында бағаланды.

44-суретте оқпанды 53%, 58%, 63% және 68% толтырумен алынған Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> жабындарының микроқұрылымы мен кедір-бұдырлық схемасы көрсетілген. Барлық жабындардың Ra мәндері 0,439 - 1,442 мкм аралығында болды. Бұл ұңғыманы толтыру дәрежесі Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> жабындарының кедір-бұдырлығына қатты әсер етпейтінін көрсетеді.



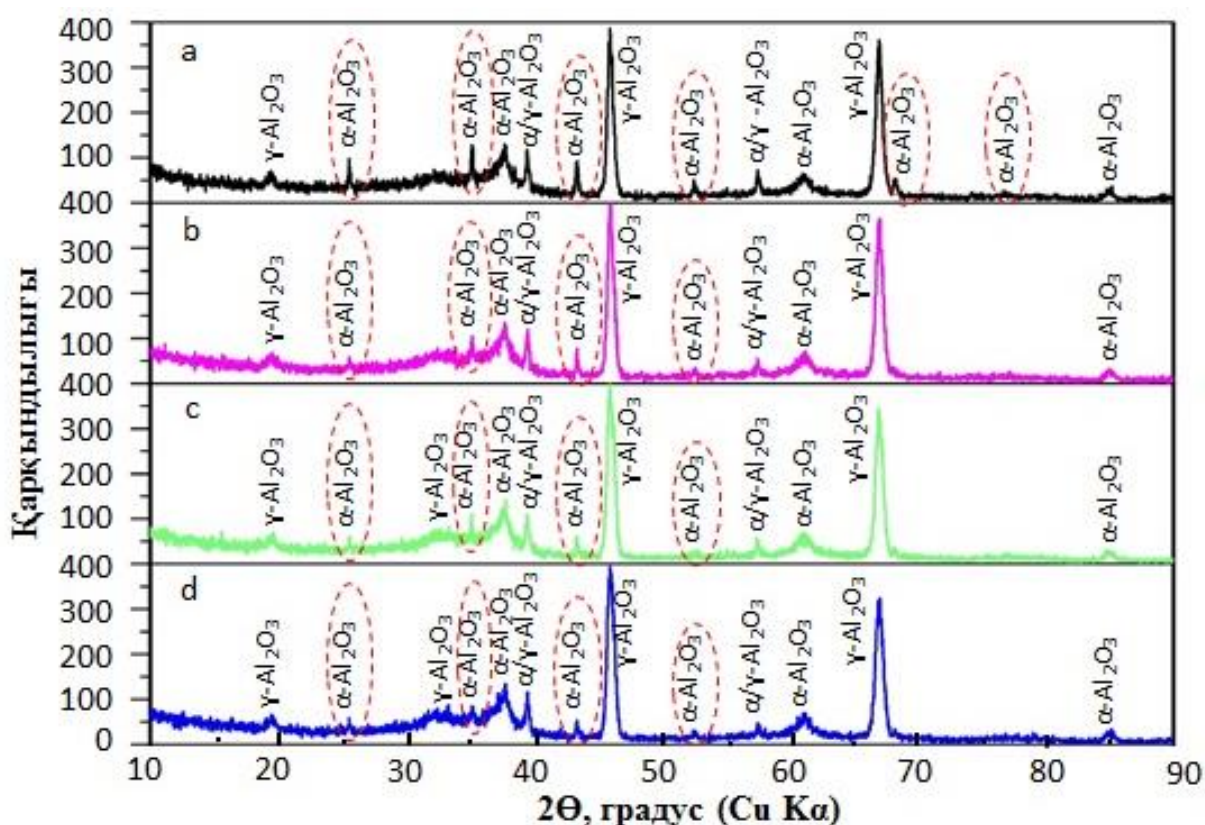
a) 53%, b) 58%, c) 63%, d) 68%

Сурет 44 - Оқпанды газға толтыру көлеміне байланысты Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> жабындарының микрофотографиясы мен кедір-бұдырлығы

45-суретте оқпанды 53%, 58%, 63% және 68% толтыру кезінде алынған Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> жабындарының дифракциялық суреттері көрсетілген. Детонациялық

тозаңдаудан кейінгі жабындар  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  (ICDD / JCPDS № 96-230-0376) және  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  (ICDD / JCPDS № 96-154-1583) тұрады. Бүріккіш ұнтақ ретінде корунд- $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  қолданылды. Алынған жабын негізінен  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  тұрады. Бұл  $\text{Al}_2\text{O}_3$  негізіндегі ұнтақ жоғары температураның әсерінен бірнеше модификациядан өтуі мүмкін [299, 300].

45-суретте ұңғыманы газбен толтырудың 53%-дан 68%-ға дейін артуымен жабындыдағы  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  фазасының үлесі артады, ал  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  фазасының үлесі төмендейді. Біздің ойымызша,  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  фазасы баррель 68% толған кезде жарылыс температурасының жоғарылауы және баррель бойымен ұшу кезінде соққы толқынының әсер етуі, содан кейін бетіне шашырауы нәтижесінде пайда болады деп болжауға болады [290 б. 6, 301]. Температура шамамен 950-1250 °C дейін көтерілгенде,  $\gamma$ -алюминий оксиді термодинамикалық тұрақты  $\alpha$ -алюминий оксидіне айналатыны белгілі. Бұл алмасулар тікелей немесе  $\delta$  - және  $\theta$ -алюминий оксиді сияқты аралық фазалар арқылы жүруі мүмкін [302, 303].



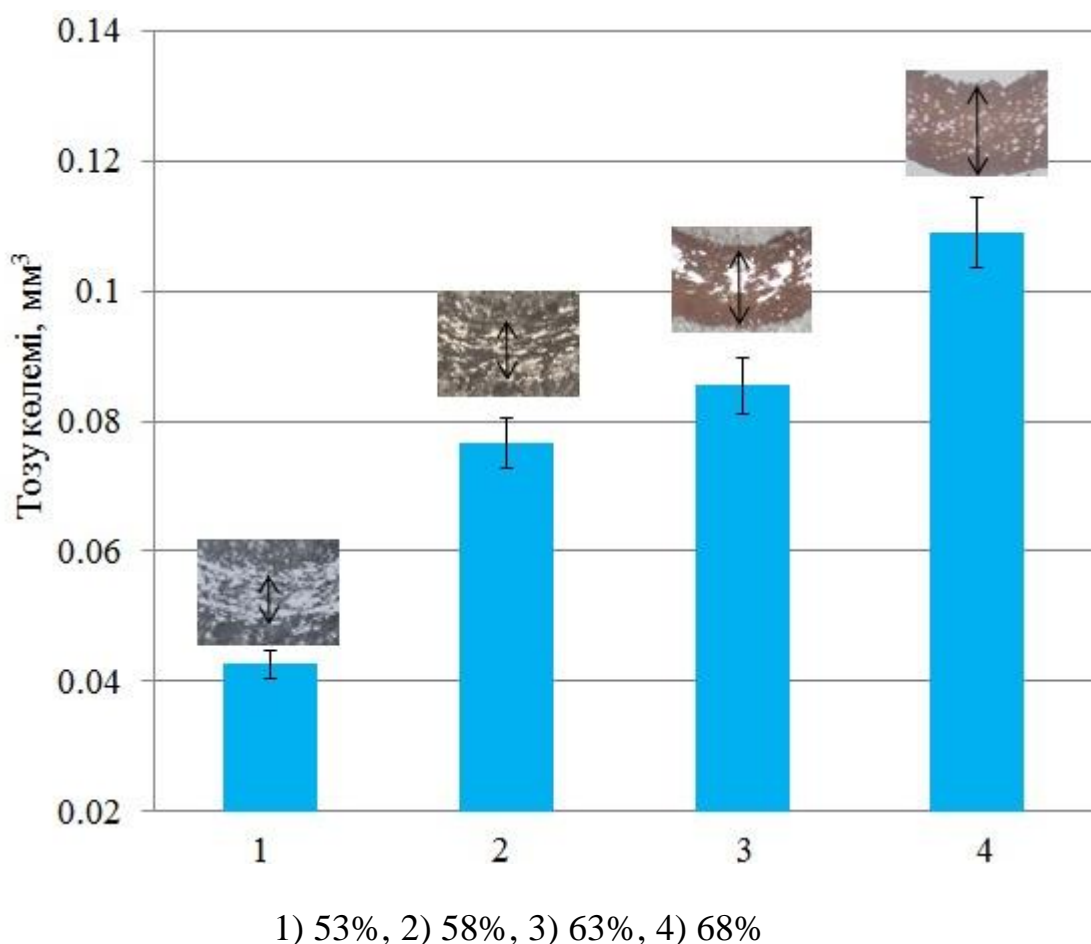
a) 53%, b) 58%, c) 63%, d) 68%

Сурет 45 - Оқпанды газбен толтырылуына байланысты алюминий оксидінен жасалған жабынды рентгендік фазалық талдау дифрактограммасы

46-суретте  $\text{Al}_2\text{O}_3$  оксидінің жабындарын шар-диск әдісімен трибологиялық сынау нәтижелері көрсетілген. Жабындардың тозуға төзімділігі тозу көлемімен сипатталды. 46-суретте үлгілердің оқпанды газға толтырылу дәрежесіне байланысты тозу көлемінің әртүрлі мәні бар екендігі көрсетілген. Бұл жағдайда тозу мөлшері бөшкелерді толтыру деңгейінің жоғарылауымен біртіндеп

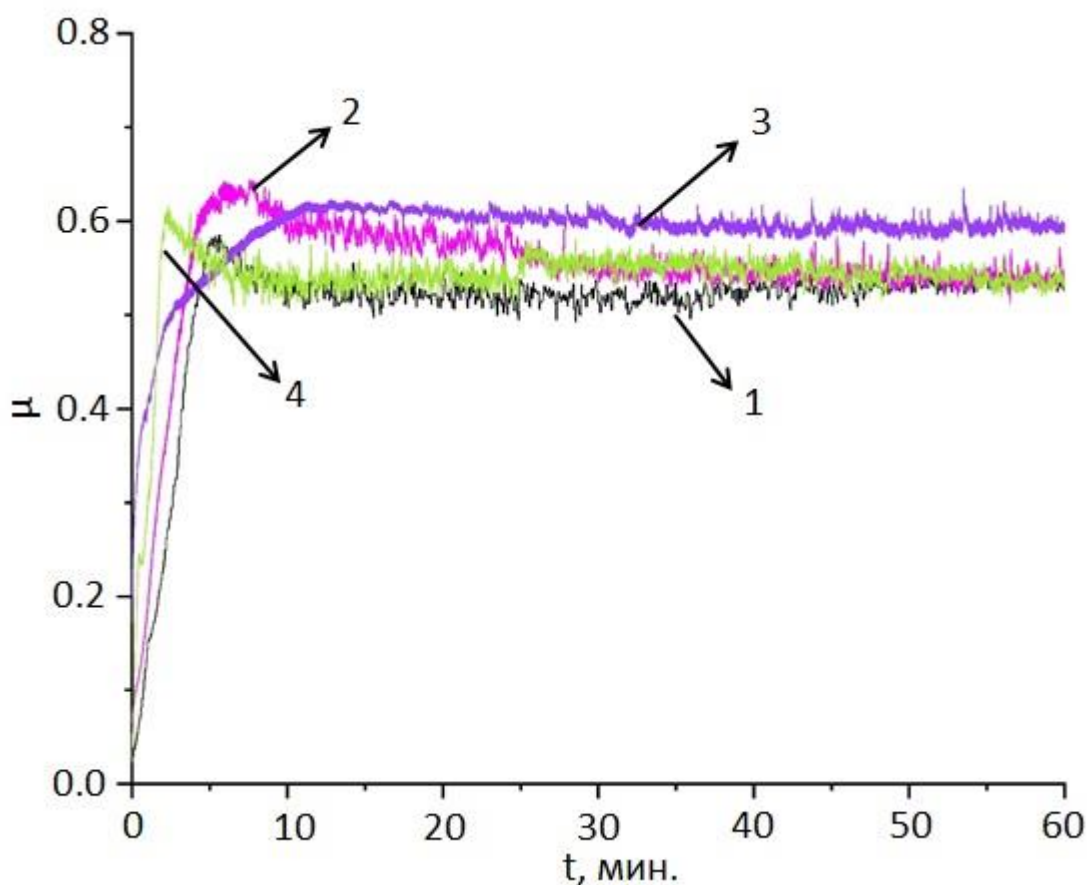


артады. Бөшкелерді 53% - ға дейін толтыру кезінде алынған жабын жоғары тозуға төзімді. Осылайша, рентгендік құрылымдық талдау негізінде алюминий оксидіне негізделген жабындардағы  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  фазаларының көлемдік үлесінің артуы олардың тозуға төзімділігінің артуына әкеледі деп айтуға болады. Себебі,  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  бірқатар ерекшеліктерге ие, оның ішінде төмен тығыздық, салыстырмалы түрде жоғары балқу температурасы, тамаша коррозияға және тозуға төзімділік, сонымен қатар жоғары температурада жоғары беріктік [304,305].



Сурет 46 - "Шар-дискі" әдісі бойынша  $\text{Al}_2\text{O}_3$  оксиді жабындарын трибологиялық сынау нәтижелері

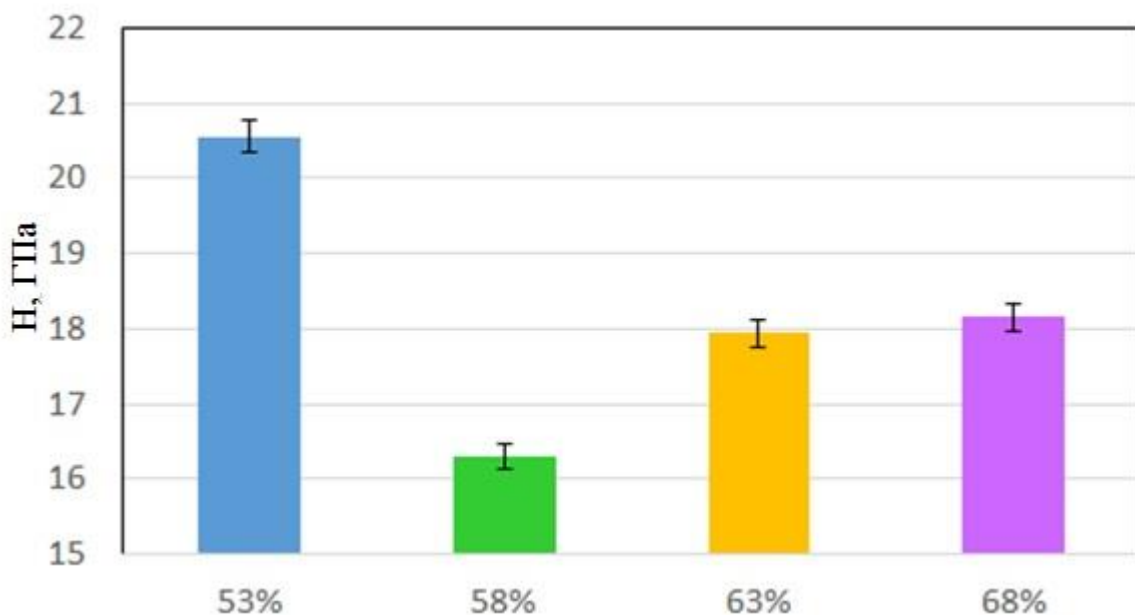
47-суретте оқпанды 53%, 58%, 63% және 68% толтырған кезде алынған жабындардың үйкеліс коэффициенттерінің графигі көрсетілген. Ұңғыманы 53%, 58% және 68% толтыру кезінде алынған барлық жабындардың үйкеліс коэффициенттері бірдей мәнге ие және  $\mu = 0,52 \pm 0,01$  құрайды, ал оқпанды 63% толтыру кезінде алынған жабын басқа үлгілермен салыстырғанда  $\mu = 0,59 \pm 0,01$  жоғары үйкеліс коэффициентіне ие. Себебі, бұл жабындардың кедір-бұдырлығы мен кеуектілігіне байланысты.



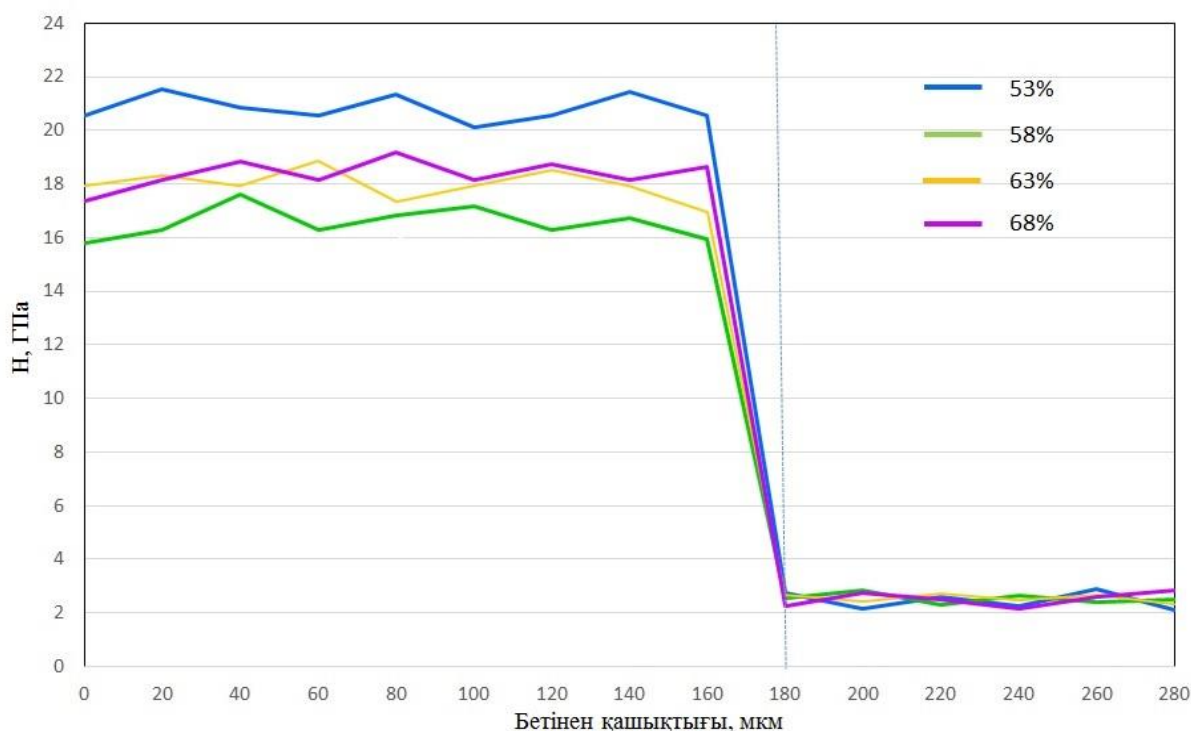
1) 53%, 2) 58%, 3) 63%, 4) 68%

Сурет 47 - Оқпанды газбен толтырылуына байланысты алюминий оксидінің жабынын трибологиялық зерттеу нәтижелері

48 және 49-суреттерде оқпанды 53%, 58%, 63% және 68%-ға газға толтыру арқылы алынған алюминий оксиді негізіндегі жабынның беткі қабатымен көлденең қимасының микроқаттылығының өзгерісі көрсетілген. Алынған жабындардың микроқаттылығы газбен толтыруға байланысты 53% -  $20,6 \pm 0,3$  ГПа, 58% -  $16,3 \pm 0,15$  ГПа, 63% -  $17,9 \pm 0,25$  ГПа, ал 68% -  $18,16 \pm 0,27$  ГПа болды. Бұл кезде микро қаттылықтың ең жоғары мәні 53% толтыруда байқалды (Қосымша Б және Г). Жабындардың микроқаттылығының артуы  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  фазаның жоғарылауымен байланысты. Жабын құрамында  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  көбірек болғанда қаттылық пен механикалық беріктігі  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  қарағанда төмен болатыны байқалды [290 б. 8].



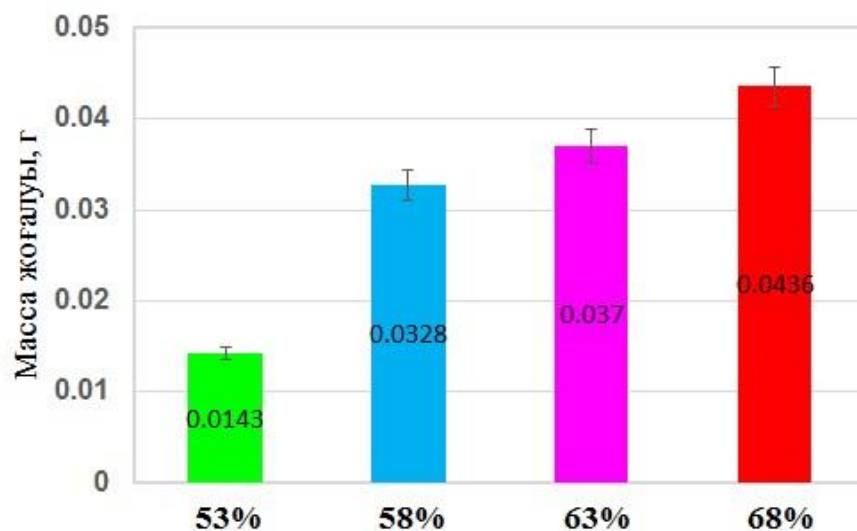
Сурет 48 - Оқпанды газға толтыруға байланысты алюминий оксиді жабындысының беткі қабатының микротаттылығының өзгеруі



Сурет 49 - Оқпанды газға толтыруға байланысты алюминий оксиді жабындысының көлденең қимасының микротаттылығының өзгеруі

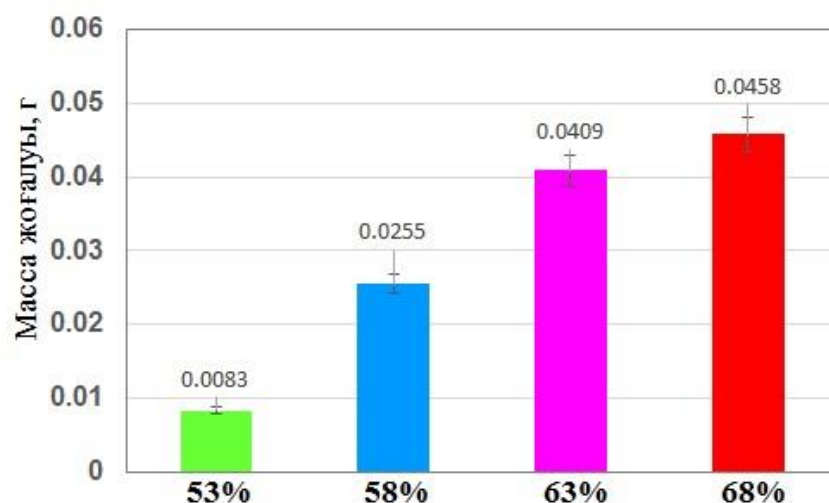
50-суретте оқпанды газға толтыру мөлшеріне байланысты, жабындардың эрозияға тұрақтылығы анықталды, зерттеу көрсеткендей жалпы құммен атқылау кезіндегі қысым 0,15 МПа, атқылау уақыты 2 мин, оқпанмен үлгінің арасы 10 мм, атқылау бұрышы 90 градус болды, графийкте көріп

отырғандарыңыздай оқпанды газға толтыру артқан сайын масса жоғалтуы 3 есеге өскенін көруге болады, яғни 53 пайыз толтыру кезінде ең аз мәнге ие болды [291]. Келесі суреттен эрозияның нәтижесі сияқты абразивті тозуға зерттеу нәтижесінде оқпанды газға толтыру мөлшері артқан сайын көбірек массалық жоғалту болғанын көрсетті.



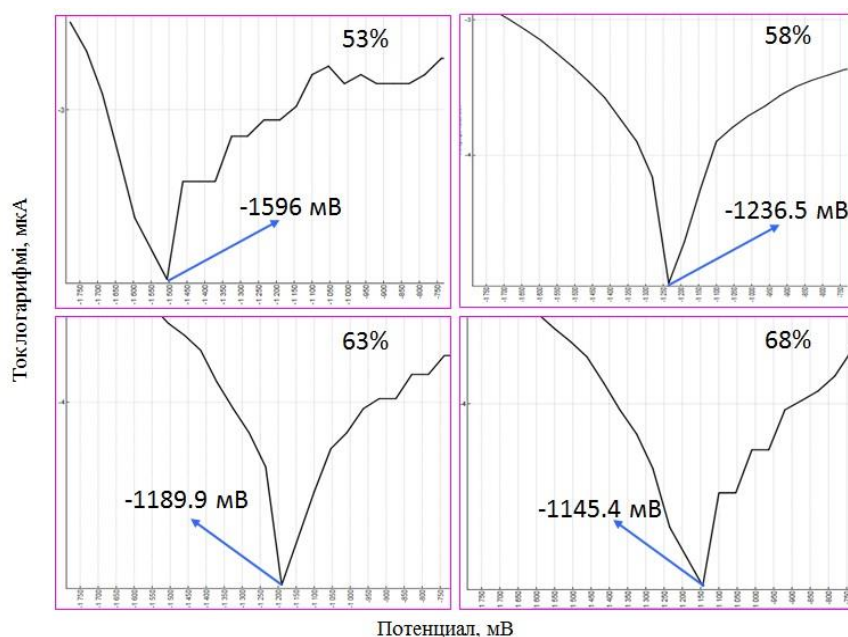
Сурет 50 - Алюминий оксиді жабынның эрозияға тұрақтылық нәтижесі

Төменде 51-суретте оқпанды газға толтыру мөлшеріне байланысты, жабындардың абразивті тозуға тұрақтылығы анықталды, Зерттеу барысында айналым саны - 600 айн./мин. 3кг жүктеме қойылып, 10 минут арнайы құралды түйіршік өлшемі 120-150 мкм болатын құммен абразивті тозу жасалды. Эрозиялық тозуға сынақ нәтижесі көрсеткендей (50-суретте) бұл жердеде оқпанды газға толтыру мөлшері 68%-ға дейін артқан кезде жабын бетінің де көбірек желіне (тоза) бастағанын көреміз, ал 53% кезінде керісінше ең минимум яғни 68% оқпанды газға толтырумен салыстырғанда 9 еседей аз масса жоғалту болғанын байқаймыз, бұндағы себеп: рентген-фазалық талдау нәтижесінде анықталғандай  $\alpha$ - $Al_2O_3$  фазаның көлемдік үлесінің ұлғаюымен деп болжауға болады [291].



Сурет 51 - Алюминий оксиді жабынның абразивті тозуға тұрақтылық нәтижесі

52-суретте оқпанды газға толтыру мөлшеріне байланысты (53-68%) алюминий оксиді жабыны потенциостат құралының көмегімен 1М  $H_2SO_4$  ертіндісінде коррозияға тұрақтылыққа тексеру нәтижесі яғни тоқ логарифмның потенциалға тәуелді графигі бейнеленген. Коррозияға зерттеу нәтижесінде оқпанды газға толтыру мөлшері артқан сайын коррозияға ұшырау жылдамдығының артқанын байқаймыз, оқпанды 53%-ға толтыру кезіндегі жабынның коррозияға ұшырауы басқалармен салыстырғанда минималды мән  $R_{\text{corr}}=0.262$  см/жыл көрсетті. Ал бұл мән төсеніш материал үшін  $R_{\text{corr}}=1.540$  см/жыл көрсетті. Қорыта айтқанда бізбен алынған жабынның коррозияға тұрақтылығы жоғары екені анықталды (Кесте 14).

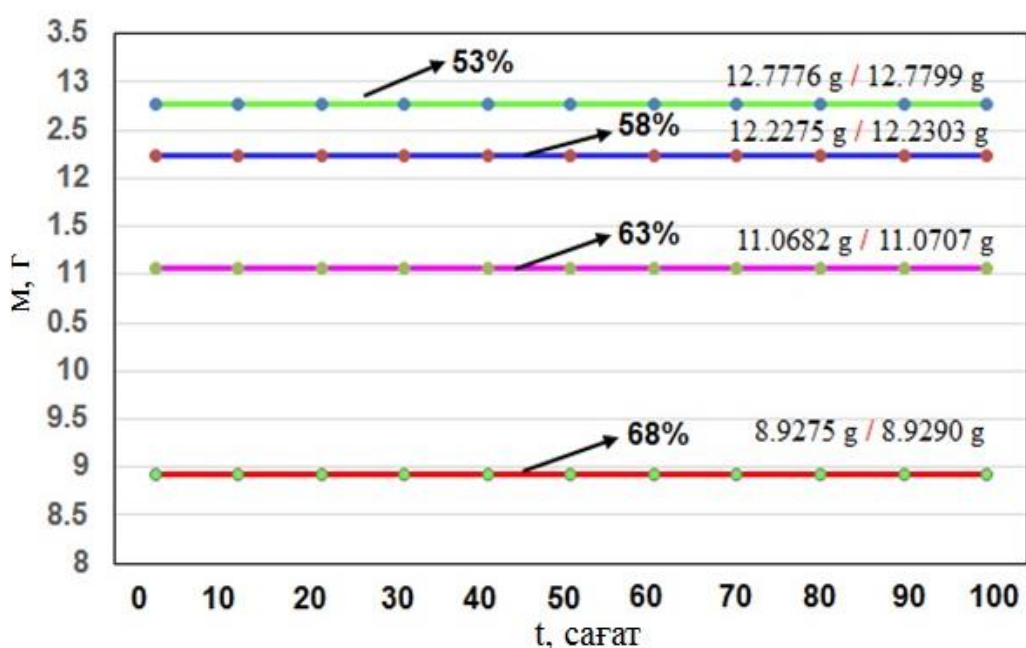


Сурет 52 - Жабынның 1М  $H_2SO_4$  ертіндісінде коррозияға тұрақтылыққа зерттеу нәтижесі

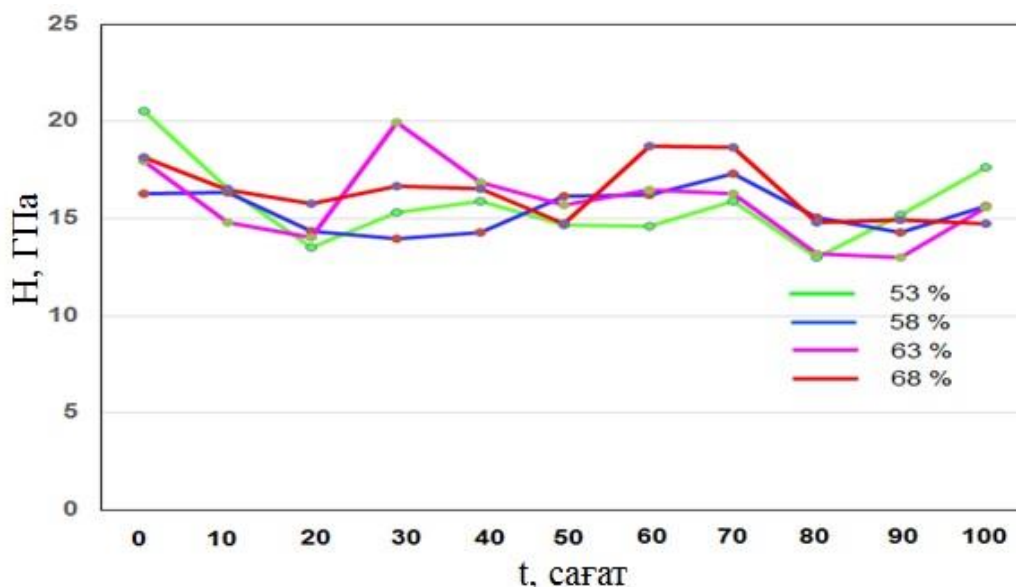
Кесте 14 - Жабынның коррозияға тұрақтылыққа зерттеу нәтижесі

| Үлгі            | S, см <sup>2</sup> | E <sub>corr</sub> , мВ | lg(i) | i <sub>corr</sub> , А | j <sub>corr</sub> , А/см <sup>2</sup> | m, г  | R <sub>corr</sub> см/жыл |
|-----------------|--------------------|------------------------|-------|-----------------------|---------------------------------------|-------|--------------------------|
| Төсеніш (болат) | 0.250              | -932                   | -3.48 | 0.000331131           | 1.32E-03                              | 3.027 | 1.540                    |
| 53 %            | 0.250              | -1596                  | -4.25 | 5.62341E-05           | 2.25E-04                              | 0.514 | 0.262                    |
| 58 %            | 0.250              | -1236.5                | -3.88 | 0.000131826           | 5.27E-04                              | 1.205 | 0.613                    |
| 63 %            | 0.250              | -1189.9                | -3.81 | 0.000154882           | 6.20E-04                              | 1.416 | 0.721                    |
| 68 %            | 0.250              | -1145.4                | -3.77 | 0.000169824           | 6.79E-04                              | 1.552 | 0.790                    |

53 және 54-суреттерде оқпанды газға толтыру мөлшеріне байланысты (53-68%) алынған алюминий оксиді жабыны 0 ден 100 сағатқа дейін 600 °С-та муфельді пеште ыстыққа төзімділігі тексерілді, әр 10 сағат сайын пешті өшіріп, пешпен бірге суытып үлгіні алып шығып массасы өлшенді, микроқұрылымы оптикалық микроскопта бақыланды және микроқаттылығы анықталды. Жалпы 4 түрлі оқпанды газға толтыруда үлгінің 0 сағаттан бастап 100 сағаттан кейінгі массалық жоғалтуы төрт жабында негізінен бірдей әрі аз мөлшерде екенін яғни 0.0015-0.0023 г болды. Ал 53-суреттегі микроқаттылықтың нәтижесіне қарап бастапқы күйінде микроқаттылығы жоғары мәнін көрсетіп тұрдыда, 10 сағаттық қыздырудан кейін 100 сағатқа дейін 14-16 ГПа көлемінде тұрғанын көреміз. Бұнда 600 °С температура төсеніш материалға және алюминий оксиді жабынының құрылым-фазалық өзгерісіне айтарлықтай әсер етпейтіндігін көреміз.



Сурет 53 - Жабынның ыстыққа төзімділігінің уақытқа байланысты массалық өзгерісі нәтижесі



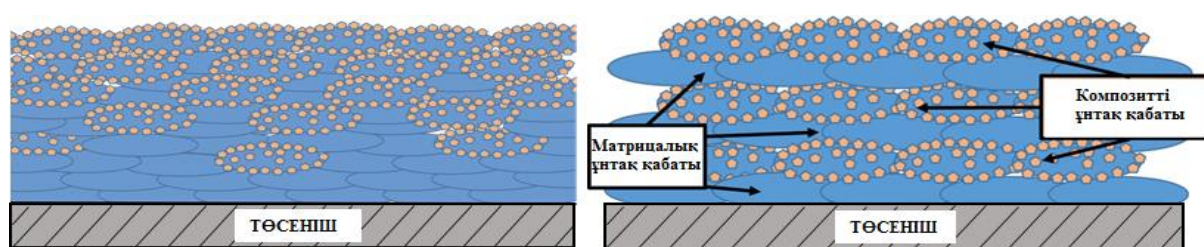
Сурет 54 - Жабынның ыстыққа төзімділігінің уақытқа байланысты микроқаттылықтың салыстырмалы нәтижесі

Бұл зерттеу бөлімінен оқпанды жарылғыш қоспаға толтыру дәрежесін 53-68%-ға арттыру арқылы алюминий оксиді жабыны алынды, оқпанды жарылғыш қоспаға толтыру дәрежесінің 68-53%-ға дейін өзгерту алюминий оксиді жабыны құрамындағы  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  фазаның мөлшері азайып, керісінше  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  фазаның үлесінің ұлғаятындығы анықталып,  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  фазаның үлесінің ұлғаюы жабынның трибологиялық қасиетінің артуына, эрозияға, абразивті тозуға, коррозияға және ыстыққа төзімділікке тұрақтылығын арттыратынына көз жеткіздік, сол себепті жоғарыдағы 4.1 және 4.2 бөлімде алынған зерттеу нәтижелерін ескере отырып, оқпанды жарылғыш қоспаға толтыру дәрежесін 68% дан 53%-ға, ату жилігін 1с-тан 0.25с-қа дейін төмендету арқылы алюминий оксидінен градиентті жабын алып, оның физикомеханикалық және трибологиялық қасиетке әсерін зерттеу мақсат ретінде қойылып келесі бөлімдегідей зерттеу жұмыстары жасалды.

### 4.3 $Al_2O_3$ негізіндегі алынған градиентті жабынның адгезиялық беріктігін және физикомеханикалық қасиетін зерттеу

Градиентті жабындардың химиялық, фазалық немесе құрылымдық құрамы, қабаттың қалыңдығы бойынша бөлім шекарасынан негізбен сыртқы бетке дейін біртіндеп өзгереді. Жабынның мұндай құрылымы негіз және жабынның материалдарының физикалық-механикалық сипаттамаларының айырмашылықтарын, сонымен қатар, жабынның құрылымдық құрамдас бөліктерінің әр түрлі шекараларындағы, әсіресе, жабынды мен негіз арасындағы кернеулердің секіруін азайтуға мүмкіндік береді. Жоғары физика-механикалық сипаттамалары бар градиентті жабындарды алу бағыттарының бірі әр түрлі ұнтақты композицияларды қолдану есебінен тозаңдату кезінде жабындардың химиялық құрамы мен құрылымының реттелетін өзгеруі болып табылады. 1990 жылдары қабаттардан және сыртқы керамикалық жабыннан, сондай-ақ аралық өтпелі металл керамикалық қабаттардан тұратын градиентті көп қабатты жабындарды алу моделі ұсынылды [33, б. 1067]. Плазмалық жылу қорғау жабындарын қалыптастыру үшін мұндай модельді қолдану, олардың жабысу беріктігін және жылуға төзімділігін екі еседен артық арттыруға мүмкіндік беретіндігі белгілі [7, б. 153].

Деректерді талдаудан, жабынның қаттылығы ұлғайған кезде адгезиялық беріктілігі айтарлықтай азаяды. Бұл қаттылықты арттыру кезінде жабынды – төсенішті бөлу шекарасының ауданы бойынша пластикалық матрицалық материалдың үлесінің азаюымен байланысты. Осылайша, егер бір жабында матрицалық жабынның жоғары адгезиондық беріктігін және композициялық жабынның жоғары қаттылығын біріктірсе, бұл жабынның сипаттамасын арттыруға мүмкіндік береді. Егер жағудың мынадай технологиялық тәсілдерін қолданса: көп қабатты жабынды жағу, функционалдық-градиентті жабынды жағу, мұндай құрылымды бір жабынның көлемінде жасауға болады (Сурет 55) [70, б. 1169].



а) көп қабатты жабын

б) функционалдық-градиентті

Сурет 55 – Жабынның схемалық құрылымы

Мұндай жабындарды алу схемалары өте ұқсас және оларды детонациялық тозаңдату әдісімен алу үшін кемінде екі дозатор бар бір технологиялық жабдықты пайдалануға болады. Берілген жабындардың құрылымы бөлшектің шекарасында жабынды - пластикалық матрицалық материалдан жасалған қабат болады, бұл сөзсіз адгезиялық беріктікті арттырады, алайда көп қабатты



жабында қабаттар арасында бөлу шекаралары бар болатын принципті айырмашылық байқалады. Сонымен қатар, көп қабатты жабында теріс әсерлердің пайда болуы мүмкін. Көп қабатты жабында қабаттар жиыны арасында кернеудің концентраторы болып табылатын химиялық құрамның (және, демек, физика-механикалық қасиеттерінің) күрт ауытқуы бар шекара болады. Көп қабатты жылу қорғау жабындарының бұзылуының негізгі себебі қабаттар шекарасындағы термомеханикалық кернеу болып табылады, бұл келесі жұмыста көрсетіледі [73, б. 4332]. Термомеханикалық кернеулер жоғары температуралы әдістермен алынған жабындарда пайда болатын қалдық кернеулердің әсерімен де күрделене түседі.

Функционалды-градиенттік жабындардың маңызды артықшылығы жабын құрамы қалыңдығы бойынша тегіс, шекаралық бетпен бөлінбей өзгертінімен ерекше болып табылады. Бұл көп қабатты жабындармен салыстырғанда оларды неғұрлым жоғары етеді. Функционалды-градиентті жабындарды алудың детонациялық тәсілінің тиімділігі мен жұмыс өнімділігін бір ғана дозатор арқылы ұнтақтың бір түрін қолданып тозаңдатып технологиялық параметрлерді өзгерту жолымен арттыруға болады. Сондай – ақ, аралас өңдеу детонациялық тозаңдау-үстіңгі қабатта жылулық өңдеу жүргізуге болады. Мұндай тәсілдер әсіресе алюминий оксиді негізіндегі жабындарды алу үшін қолайлы. Осыған байланысты, осы тарауда функционалды-градиенттік жабындарды алу мүмкіндіктері зерделенді. Градиентті құрылымдарды қалыптастыру үшін  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  фазасының көлемдік үлесін төсеніштен беткі қабатқа біртіндеп арттыруға негізделген әдіс іске асырылды. Бұл әдіс тозаңдану кезінде ату жиілігін бірте-бірте азаяды. Бұл әдіс 3-тарауда сипатталған эксперименттік зерттеулердің нәтижелері негізінде әзірленген.

Детонациялық әдісті қолданып оқпанды (стволь) 53 тен 68%-ға дейін  $\text{C}_2\text{H}_2/\text{O}_2$  газ қоспасымен толтыра отырып, төсеніштің (подложка) бетіне алюминий оксиді негізіндегі градиентті жабын алынды. Алынған жабындардың микроқұрылымы растрлық электронды микроскопиялық талдау көмегімен зерттелді. Жабынның беткі қабатқа қарай  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  фазаның үлесін 10-15%-ға арттыру арқылы беріктігі, тозуға тұрақтылығы жоғарлаған жабын қабаты алынды. Рентген- құрылымдық зерттеу арқылы, оқпанды газға толтыру мөлшері мен ату жиілігін 1с- тан 0.25с азайту кезінде  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  торларының өзгерісі зерттелді. Оқпандағы газдың мөлшерін 68 ден 53%-ға және ату жиілігін 1с тан 0.25с-қа азайту арқылы механикалық қасиеті жақсартылған үйлесімді градиентті жабын қабаты алынды, алынған градиентті жабынның микроқаттылықтың ең жоғары мәні 23.73 ГПа-ды көрсетті. Алынған жабындардың трибологиялық қасиеті зерттеліп, градиентті жабынның үйкеліс коэффициентінің мәні басқа жабындардікімен салыстырып қарағанда 50%-дай төмен яғни тозуға берік екенін көрсетті [291].

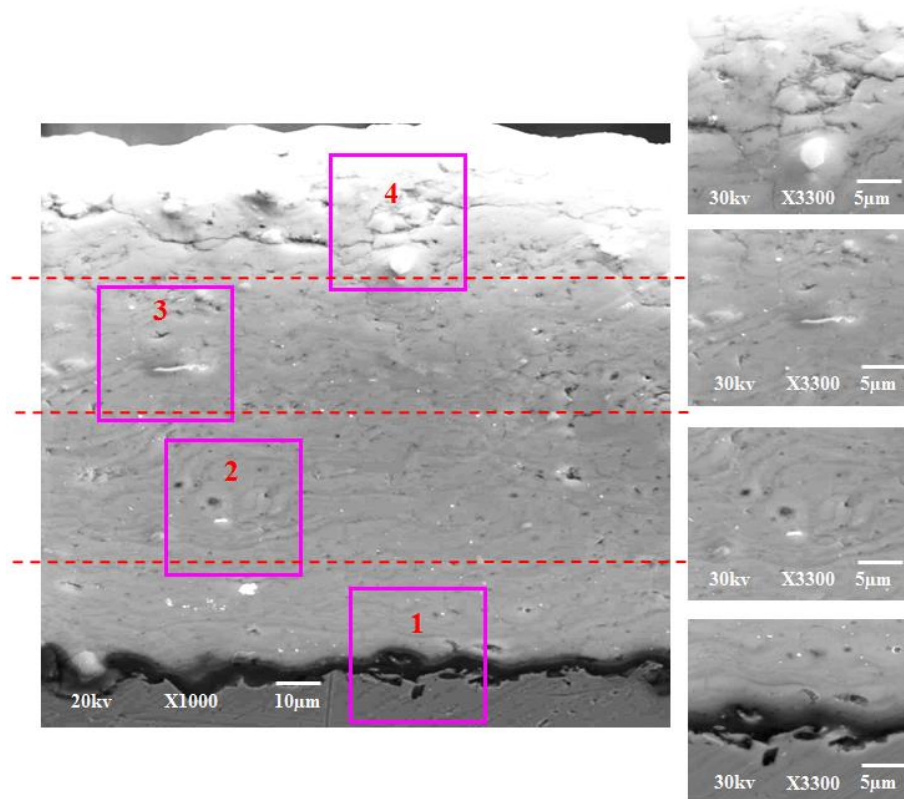
Біз отын газы ретінде ацетилен - оттегі қоспасын қолдана отырып, бөшкелерді толтырудың әртүрлі көлеміне арналған  $\text{Al}_2\text{O}_3$  жабынын алдық. Жарылыс қаупі бар қоспаның үлесі ұлғайған сайын (оқпан көлемінің 53% - дан 68% - ға дейін) оқпан ішіндегі бөлшектер қызатын температура артады. Сонымен қатар, бөлшектердің төменгі жылдамдығы үшін оттегі / отын

қатынасын  $O_2/C_2H_2 = 1.1$ -ден  $O_2/C_2H_2$ -ге өзгерту жарылғыш қоспаның берілген көлемі үшін температураның жоғарылауына әкелуі мүмкін.

Біз  $O_2/C_2H_2 = 1.856$  оңтайлы арақатынас ретінде таңдадық, ол тозандау кезінде ұнтақ материалдың толықтай балқуын қамтамасыз етеді.  $Al_2O_3$  негізіндегі градиентті жабынды алуда оқпанды толтыру көлемі 53% - дан 68% - ға дейін алынды. Жабынның қалыңдығы 160-200 мкм. Жабынның кеуекті құрылымы бар. қуыстың орташа мөлшері 8-10 мкм. Әр үлгіге 68%-дан 53%-ға азайту арқылы 5 реттен жалпы 20 рет атылды.

Біз алюминий оксиді жабынын алуда оқпанды (ствол) газға ( $C_2H_2/O_2$ ) толтыру көлемдерін 68%-дан 53%-ға азайта отырып детонациялық тозандау арқылы градиентті жабын қабаты алынды. 56-суретте градиентті жабын үшін беттік микроқұрылымы мен кедір-бұдырлық өлшемі көрсетілген. Біз жабынның кедір-бұдырлығын сипаттайтын негізгі параметр ретінде  $R_a$  параметрін, профильдің орташа арифметикалық ауытқуын таңдадық. Оқпанды газға толтыру көлемін азайту негізінде алынған градиентті жабынның кедір-бұдырлық мәні  $R_a = 0.269$  мкм болады. Осыған дейінгі зерттеуімізде 53%, 58%, 63% және 68% дейін толтырған кездегі жабындардың  $R_a$  мәндері 0.439-1.442 мкм аралығында болды. Оқпанды (ствол) 58%-ға толтырған кезде алынған жабынның кедір-бұдырлық мәні  $R_a = 1.442$  мкм болады. Градиентті жабынның бетінің кедір-бұдырлығы 2 еседей аз көрсетті. Бұл соққы толқынының әсерінен және жабынның тығыздалуына байланысты болуы мүмкін. Алынған зерттеу нәтижелеріне қарап жабын бетінің кедір-бұдырлығының өзгеруі, оқпанды газға толтыру дәрежесімен сондай-ақ жабынның құрамындағы  $\alpha-Al_2O_3$  және  $\gamma-Al_2O_3$  фазаның үлесіне байланысты екенін көрсетті [290 б. 5, 291].

57-суретте жабынның бүйір бетінен 68 %, 63%, 58%, 53%-дық оқпанды газбен толтырудан кейінгі алынған градиентті алюминий оксиді жабынының микроқұрылымы мен сызықтық талдау нәтижесі бейнеленген. Жабынды алмас бұрын жабынның беті универсальды вакуумдык поста көміртегімен қапталды, себебі, алюминий оксиді жабынға айналған кезде керамикаға айналатындықтан, беттік морфологиясын көру қиындық тудырады, сол үшін арнайы көміртегімен қапталды. Суреттен құрылымның біртекті жақсы жағылғанын, градиентті жабындарды орналастру келесідей жүзеге асырылды, осыдан бұрынғы зерттеулерімізде [290 б. 3, 306] жеке-жеке 53-68 % -ға дейін оқпанды газға толтырып, алынған алюминий оксиді жабынының фазалық қалыптасуы зерттелініп алынды, сол арқылы төсеніштің бетіне, 68 % (1с) толумен бірінші 5 қабат (слой) жағылды, оның бетіне 63 % (0.75с) толумен екінші 5 қабат (слой) жағылды, жалғасты 58 % (0.5с) толумен үшінші 5 қабат (слой) жағылды және соңғы 53 % (0.25с) толумен үшінші 5 қабат (слой) жағылды, бұнда оқпанды газға толтыру көлемін және ату кезіндегі кідіріс уақытын өзгерту арқылы градиентті жабын қабаты түзілді. Сызықтық талдауға қарап, жабын бетінде алюминий мен оның оксидінің көбірек екенін және төсенішке (подложка) өткенде темірдің рескі артқанын көреміз, жабын бетімен төсеніш бетінде бірдей көміртегінің атомдары бір деңгейде екенін көреміз.



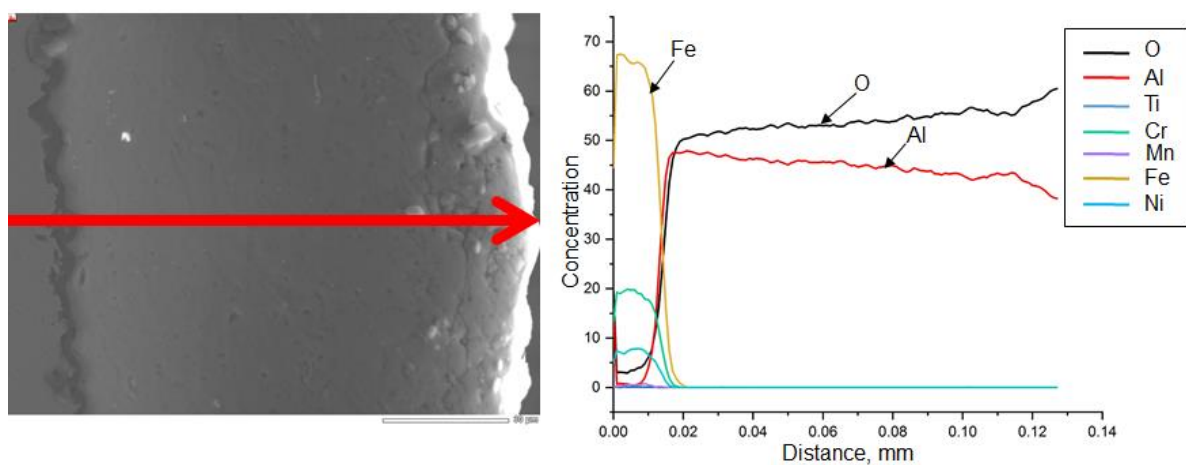
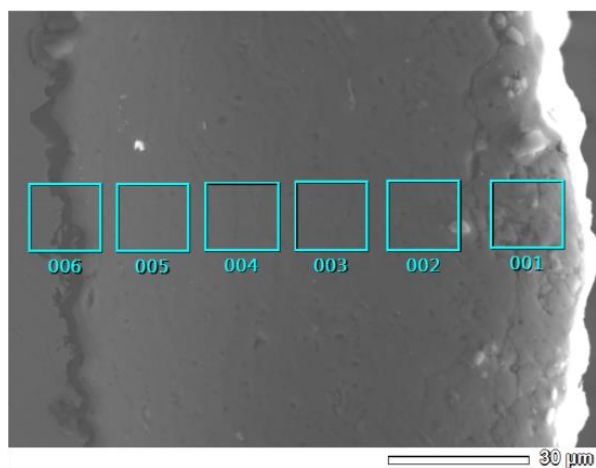
1) 68%, 2) 63%, 3) 58%, 4) 53%

Сурет 56 -  $Al_2O_3$  негізіндегі градиентті жабынның көлденең қимасының микроқұрылымы

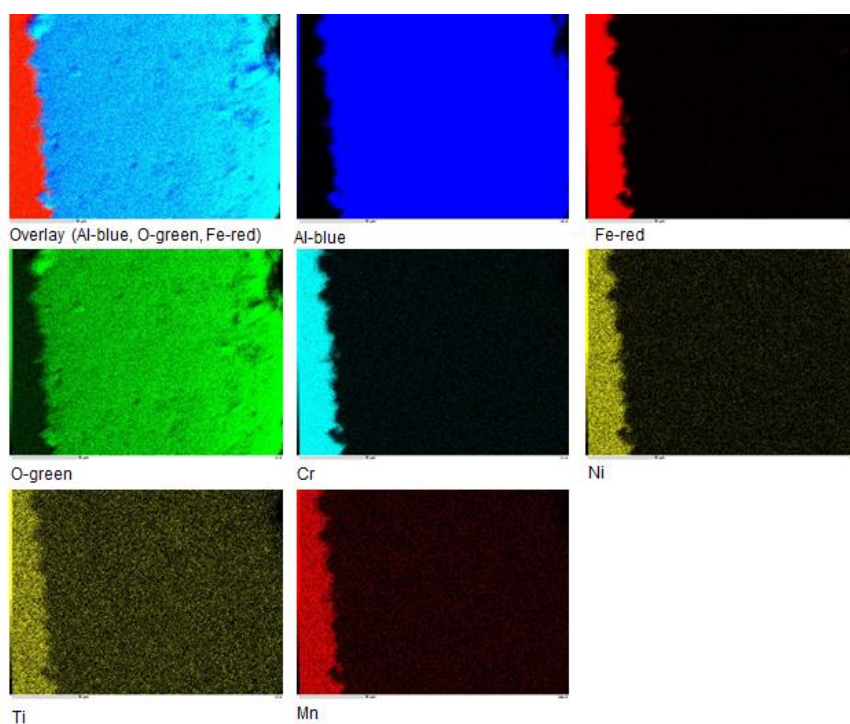
57-суретте және 14-кестеде алты нүктеде жүргізілген ЭДС талдау нәтижелері көрсетілген. Көріп отырғаныңыздай, алюминий оксидінің мөлшері 001 спектрінен 005 спектріне дейін негізінен тұрақты тарлағанын, ал 006 спектрде Fe элементінің көптеп және аз мөлшерде Ni мен Cr элементтерінің бар екендігін көруге болады, бұл 65-суретте көрініп тұрғандай спектрлік талдау жартылай төсеніш (подложка) материалдан алынғандығын байқаймыз.

Кесте 14 -  $Al_2O_3$  градиент жабынының көлденең қимасының РЭМ бейнесі және ЭДС талдауы.

| Элемент    | O,<br>Масс% | Al,<br>Масс % | Cr,<br>Масс % | Fe,<br>Масс % | Ni,<br>Масс % | Жалпы,<br>Масс % |
|------------|-------------|---------------|---------------|---------------|---------------|------------------|
| Спектр 001 | 57.13       | 42.87         |               |               |               | 100.00           |
| Спектр 002 | 55.90       | 44.10         |               |               |               | 100.00           |
| Спектр 003 | 54.67       | 45.33         |               |               |               | 100.00           |
| Спектр 004 | 54.12       | 45.88         |               |               |               | 100.00           |
| Спектр 005 | 52.98       | 47.02         |               |               |               | 100.00           |
| Спектр 006 | 22.17       | 36.91         | 8.76          | 28.91         | 3.25          | 100.00           |

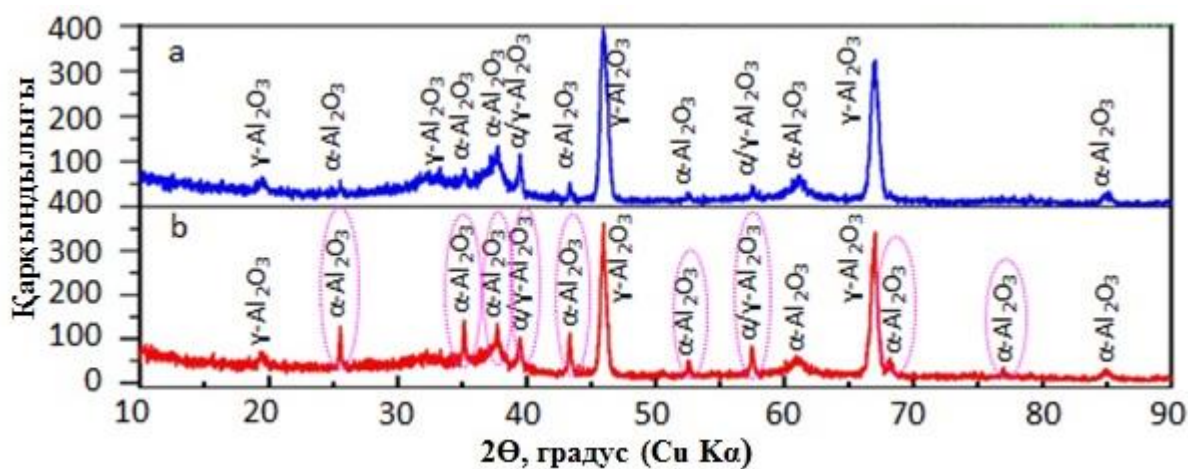


Сурет 57 -  $\text{Al}_2\text{O}_3$  градиентті жабынының РЭМ көлденең қимасының бейнесі (а) және тереңдігіне байланысты элементтердің таралуы (б).



Сурет 58 -  $\text{Al}_2\text{O}_3$  градиентті жабынының элементтердің таралу картасы

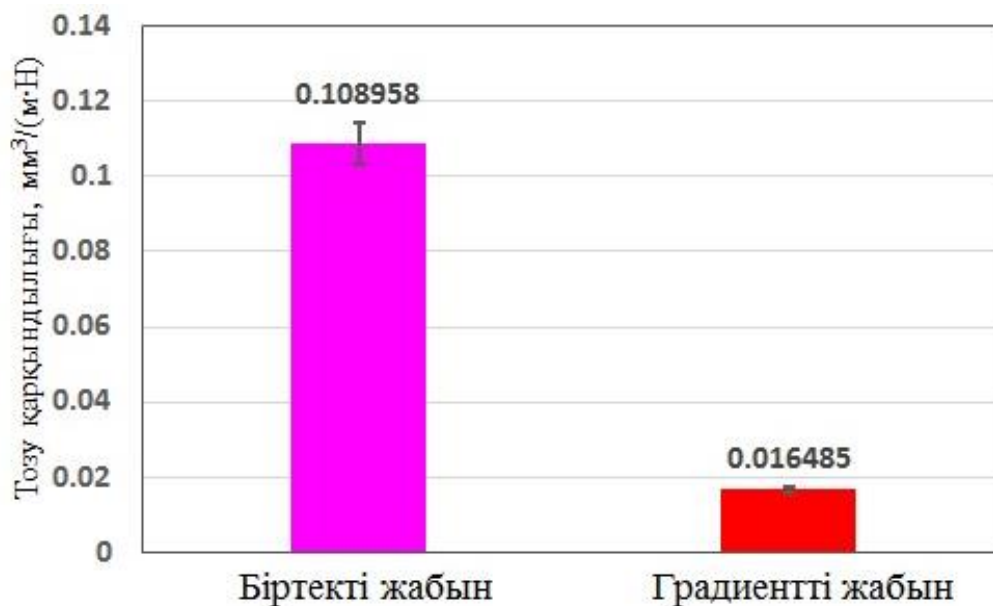
59-суретте оқпанды 58 % газға толтыру кезіндегі және градиентті жабынның рентген-фазалық талдау нәтижесі салыстырмалы бейнеленген. Оқпанды 58 % пайызға дейін газбен толтыру кезінде, детонациялық жарылыстың әсерінде пайда болған алюминий оксиді жабынының құрамындағы  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  фазаның үлесі көбейіп керісінше  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  фазаның үлесі азайғанын көреміз (59-а, суретте). Біз осы арқылы алюминий оксидін құрамының яғни фазалық өзгерісін реттей отырып келесідей жабын қабатын алдық, төсеніштің (подложка) бетіне алдымен оқпанды 68 %-ға газбен толтыру арқылы  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  фазаның үлесі көбірек жабынды төсеп алдық, жалғасты оқпанды 63 %-ға толтырып, келесі қабатты (слойды)  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  фазаның мөлшерін аздап азайтып,  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  фазаның үлесін аздап арттырдық, оқпанды 58%-ға толтырып, жабынның құрамындағы  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  фазаның мөлшерін жалғасты азайта отырып,  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  фазаның үлесін арттыра түстік, жалғасты келесі жабынды (слойды) алуда оқпанды 53%-ға толтыру арқылы, жабынның құрамындағы  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  фазаның үлесін арттырдық (59-б, суретте), бұндағы мақсатымыз бірғана дозаторды қолданып, бірғана ұнтақпен (алюминий оксиді) градиентті жабын қабатын алу, сол негізде механикалық қасиеті жақсартылған жабын қабатын қалыптастырдық, жабын құрамындағы  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  фазасы жабынның пластикалылығы мен серпімділігін арттырса,  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  фаза жабынның тығыздығы мен беріктігін арттырады [291].



Сурет 59 - Алюминий оксиді негізіндегі біртекті жабынмен градиентті жабынның рентген-фазалық талдау дифрактограммасы

60 және 61 суреттер  $\text{Al}_2\text{O}_3$  оксиді негізіндегі градиентті жабынмен төсеніш (подложка) материалды шар-дискілік сынақтардан кейін трибологиялық қасиеті салыстырылып зерттелді. 60-суретте жоғалған көлем бойынша нәтиже бейнеленді. Көріп отырғанымыздай, Оқпанды (ствол) толтыру дәрежесін беткі қабатқа қарай 68-дан 53%-ға дейін азайту арқылы төсеніш материалға жақын жақта  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  фазаның үлесін арттырып, ал беткі қабатқа қарай  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  фазаның мөлшерін жоғарлатудың нәтижесінде алынған градиентті жабынның тозуға төзімділігі жоғары болды. Рентген-фазалық талдау мұны  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$

фазаның дифрактограмма сызықтарының интенсивтілігінің өсуімен түсіндірді (59-б суретті қараңыз).

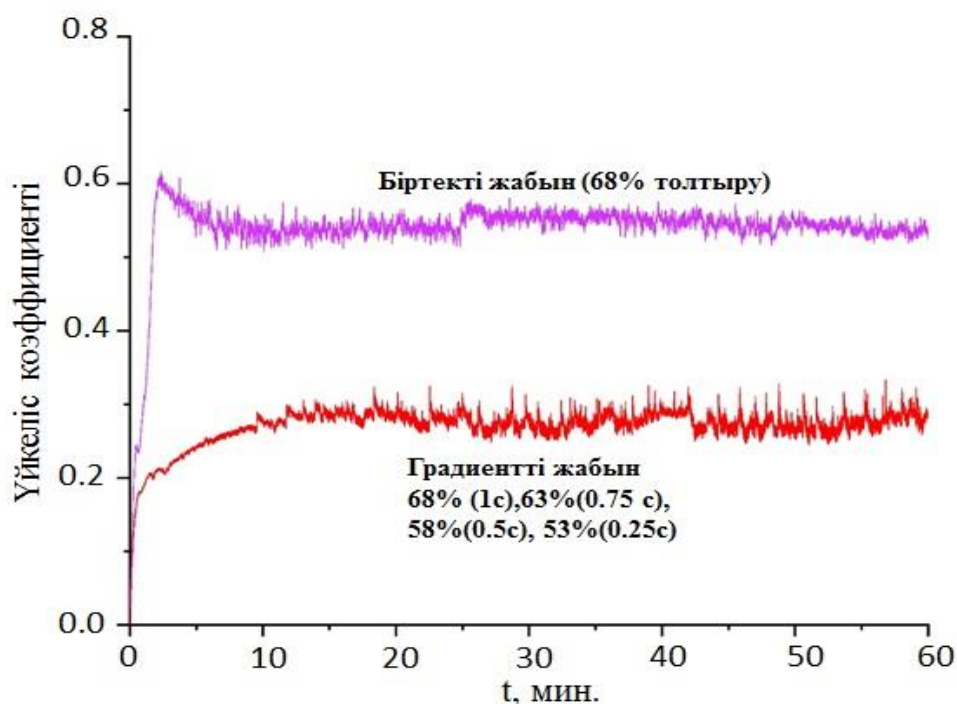


Сурет 60 -  $Al_2O_3$  оксиді негізіндегі біртекті жабынмен градиентті жабынның салыстырмалы тозу қарқындылығының нәтижелері

61-суретте градиентті жабынның төсеніш материалмен салыстырмалы үйкеліс коэффициенттерінің уақытқа байланысты графиктері көрсетілген. Осыған дейінгі зерттеу мақаламызда 53-68%-ға дейін газға толтыру кезінде алынған жабындардың үйкеліс коэффициенттері жеке-жеке зерттеліп  $\mu = 0,52-0,59$  болатынын айтқан болатынбыз [290, 291]. Төсеніш материалдың үйкеліс коэффициенті  $\mu = 0,6-0,8$  болды, градиентті жабынның үйкеліс коэффициенті мәні  $\mu = 0,027-0,33$  –ды, яғни Градиентті жабынның үйкеліс коэффициентінің мәнін, төсеніш материалмен салыстырғанда тозуға беріктігі 50%-дай артқанын көруге болады. 15-кестеде 12X18H10T болаттың механикалық және трибологиялық қасиеттері мен  $Al_2O_3$  негізіндегі градиентті жабынының салыстырмалы мәліметтері көрсетілген. Ұсынылған градиентті жабын осы болаттан жасалған бұйымдарға жоғары физика-механикалық және пайдалану қасиеттерін береді деп айтуға болады. Біздің ойымызша қаттылық пен тозуға төзімділіктің жоғарылауы жабынның құрамындағы  $\alpha-Al_2O_3$  фаза үлесінің жоғарылауымен байланысты деп болжауға болады.  $\alpha-Al_2O_3$  фаза бірқатар ерекшеліктерге ие, оның ішінде төмен тығыздық, салыстырмалы түрде жоғары балқу температурасы, тамаша коррозияға және тозуға төзімділік, жоғары температурадағы беріктік сияқты қасиеттерді қалыптастырады [306, б. 1745]. Осы себептерге байланысты  $Al_2O_3$  негізіндегі жабындар жоғары температурада және агрессивті ортада жұмыс атқаратын болаттар мен қорытпалардың беткі қабатын қорғайтын негізгі материалдардың бірі ретінде қолданылады.

Кесте 15 -  $Al_2O_3$  негізіндегі градиентті жабын мен төсеніш материалдың салыстырмалы трибомеханикалық сипаттамалары нәтижелері

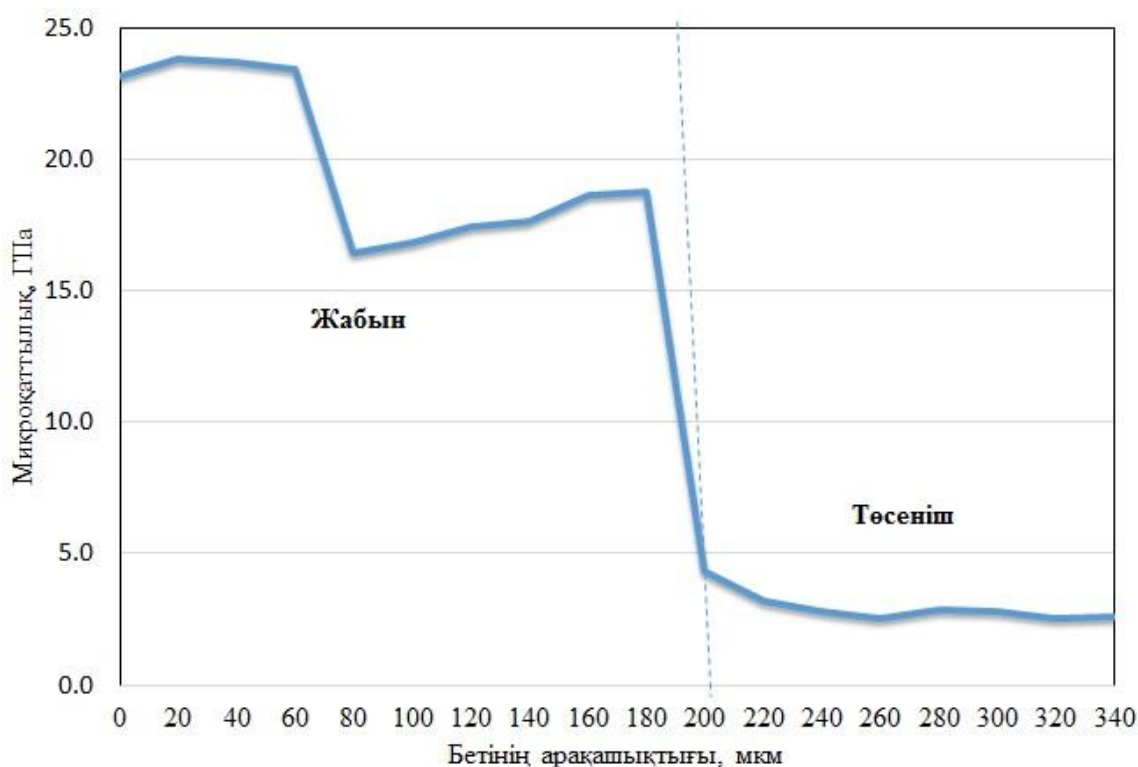
| Аты              | Фазалық құрамы                                 | Микроқаттылық, ГПа | Үйкеліс коэффициенті | Тозу көлемі, $mm^3$ |
|------------------|--|--------------------|----------------------|---------------------|
| Төсеніш          | $\alpha$ -Fe                                   | 2.50–3.50          | 0.6–0.8              | 0.085               |
| Градиентті жабын | $\alpha$ - $Al_2O_3$ ,<br>$\gamma$ - $Al_2O_3$ | 16.40–23.73        | 0.27–0.33            | 0.0165              |



Сурет 61 - Алюминий оксиді негізіндегі біртекті жабынмен градиентті жабынының салыстырғандағы трибологиялық зерттеу нәтижесі

Осыған дейінгі зерттеуімізде оқпанды 53-68% дейін газға толтыру арқылы алынған алюминий оксиді жабынының микроқаттылығына 16.31-20.56 ГПа аралығында көрсетті, микроқаттылықтың жоғары мәні 53 % толтыру кезінде байқалды [290, б. 8]. Газды толтыру дәрежесімен ату кезіндегі кідіріс уақытын өзгерте отырып алынған градиентті жабынның микроқаттылығының ең жоғары мәні 23.73 ГПа-ды көрсетті, яғни 53-68%-ға дейінгі толтыруларымен салыстырғанда микроқаттылықтың мәні 15%-ға жуық өскені байқалды. Салыстырып қарағанда жалпы микроқаттылық 53%-ға оқпанды толтырумен ату кезіндегі кідіріс уақыты 0.25с болғанда жоғарылайтыны анықталды.

62-суретте  $Al_2O_3$  оксидінен тұратын градиентті жабын қабатының көлденең қимасынан қалыңдығы бойынша микроқаттылықтың таралуы келтірілген. Көріп отырғанымыздай, тәуелділік біркелкі емес. Микроқаттылық  $\alpha$ - $Al_2O_3$  фазасы басым болған жерде үлкен болады және  $\gamma$ - $Al_2O_3$  фазасы көбейген бөлікте айтарлықтай төмендейді.



Сурет 62 -  $Al_2O_3$  градиентті жабынының қалыңдығы бойынша көлденең қимасынан микроқаттылығының таралуы.

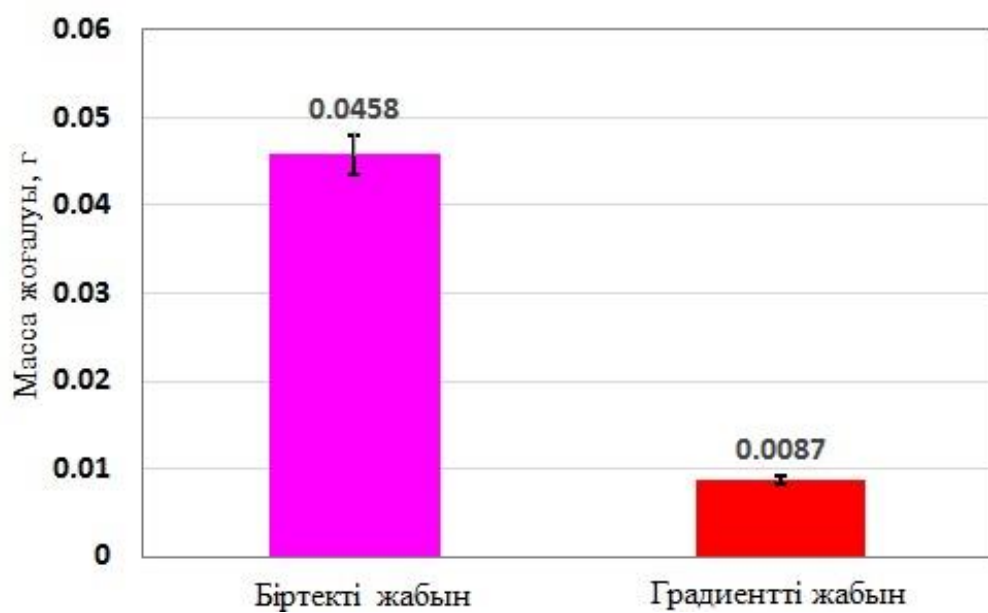
16-кестеде градиентті жабынының төсеніш материалмен салыстырғандағы абразивті тозуның салыстырмалы нәтижелері көрсетілген, зерттеу нәтижелеріне қарасақ абразивті тозу коэффициенті стандартты материал 40X болат үшін, 1-ді көрсетсе, төсеніш материал үшін 0.968-ді,  $Al_2O_3$  негізіндегі градиентті жабыны үшін 6.921-ді көрсетті, Бізбен алынған градиентті жабынның абразивті тозу коэффициентінің мәні стандартты және төсеніш материалмен салыстырғанда 7 есеге жуық жоғарлады.

Кесте 16 -  $Al_2O_3$  негізіндегі градиентті жабынының төсеніш материалмен салыстырғандағы абразивті тозуның салыстырмалы нәтижелері.

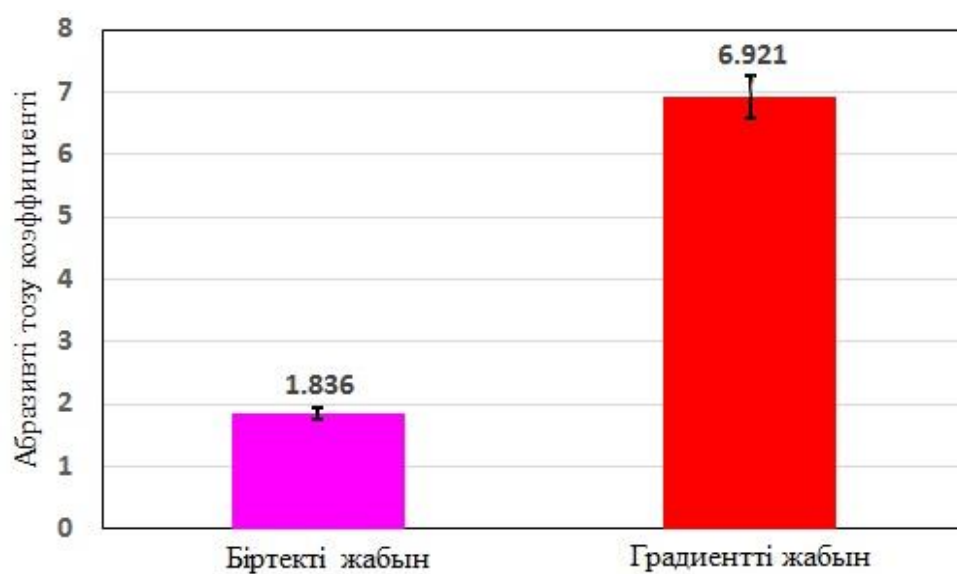
|                  |          |         |        |        |        |        |                      |
|------------------|----------|---------|--------|--------|--------|--------|----------------------|
| Үлгілер          | болат 45 | төсеніш | 53%    | 58%    | 63%    | 68%    | (68%, 63%, 58%, 53%) |
| $\Delta W_{[c]}$ | 0.0308   | 0.0314  | 0.0083 | 0.0255 | 0.0409 | 0.0328 | 0.0087               |
| K                | 1        | 0.968   | 7.254  | 2.361  | 1.472  | 1.836  | 6.921                |

63-суретте градиентті жабынның абразивті тозуға төзімділігі біртекті жабынмен салыстырылып зерттеу нәтижесі бейнеленген. Массалық жоғалтуына қарай отырып, бізбен алынған градиентті жабынның массалық жоғалуы яғни абразивті тозуының мәні 5 есеге жуық азайды. 64-суретте абразивті тозу коэффициентінің мәніне қарап, градиентті жабындікі біртекті жабынға қарағанда 3.5-4 есеге абразивті тозуға берік екенін көрсетті.



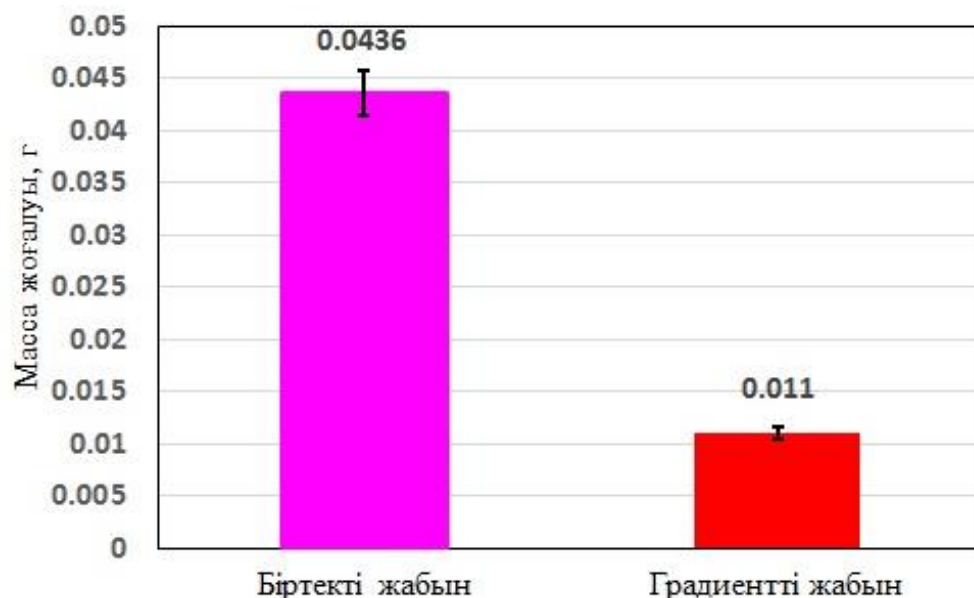


Сурет 63 - Градиентті жабынның біртекті жабынмен салыстырғандағы абразивті тозуға тұрақтылығының өзгерісі



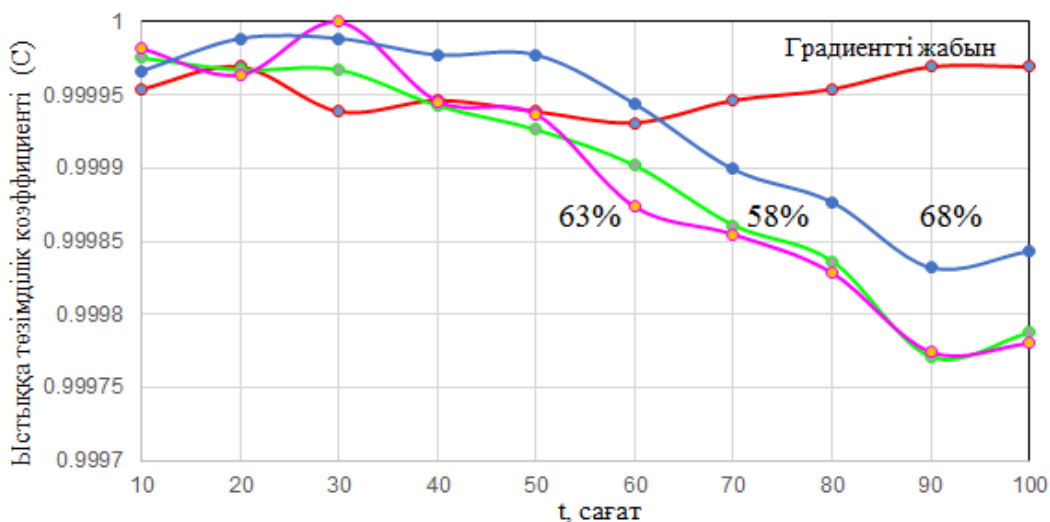
Сурет 64 - Градиентті жабынның біртекті жабынмен салыстырғандағы абразивті тозуға тұрақтылық коэффициентінің өзгерісі

65-суретте градиентті жабынның эрозияға төзімділігін біртекті жабынмен салыстырмалы зерттеу нәтижесінің графигі бейнеленген. Эрозиялық масса желінуі бойынша градиентті жабында ең төменгі мәнге ие болды. Бұл зерттеуге қарай отырып және жоғардағы трибологиялық, механикалық зерттеу нәтижелеріне ұқсас градиентті жабын біртекті жабынға қарағанда 4 есеге жуық эрозиялық тұрақтылыққа ие екенін анықталды.

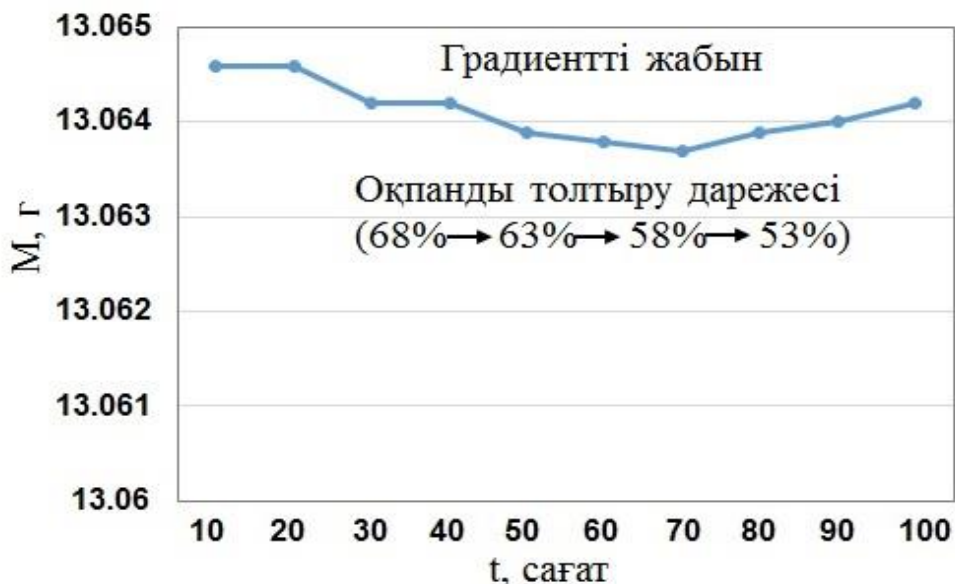


Сурет 65 - Эрозиялық желіну кезіндегі массалық жоғалтуы

66-суретте градиентті жабынның басқа жабындармен салыстырмалы ыстыққа төзімділік коэффициентінің уақытқа тәуелді графигі бейнеленген. Графиктен басқа жабындардың ыстыққа төзімділік коэффициентінің жоғары температурада 50 сағаттан кейін біртіндеп төмендей бастағанын, ал градиентті жабында 0 сағаттан 100 сағатқа дейінгі аралықта өзгермей яғни тұрақты бір қалыпты болғаны байқалады, бізбен әзірленген градиентті жабынның ыстыққа төзімділігі тұрақты деп айтуға болады. 67-суреттегі графикте градиентті жабынның жоғары температурада уақытқа тәуелді массалық ауытқуы бейнеленген. Үлгінің массасы, микроқаттылығы және микроқұрылымы әр 10 сағат сайын пештен алынып шығып зерттелді, үлгі өзінің бастапқы күйінің массасын соңына дейін негізінен бірқалыпты сақтады деп айтуға болады.

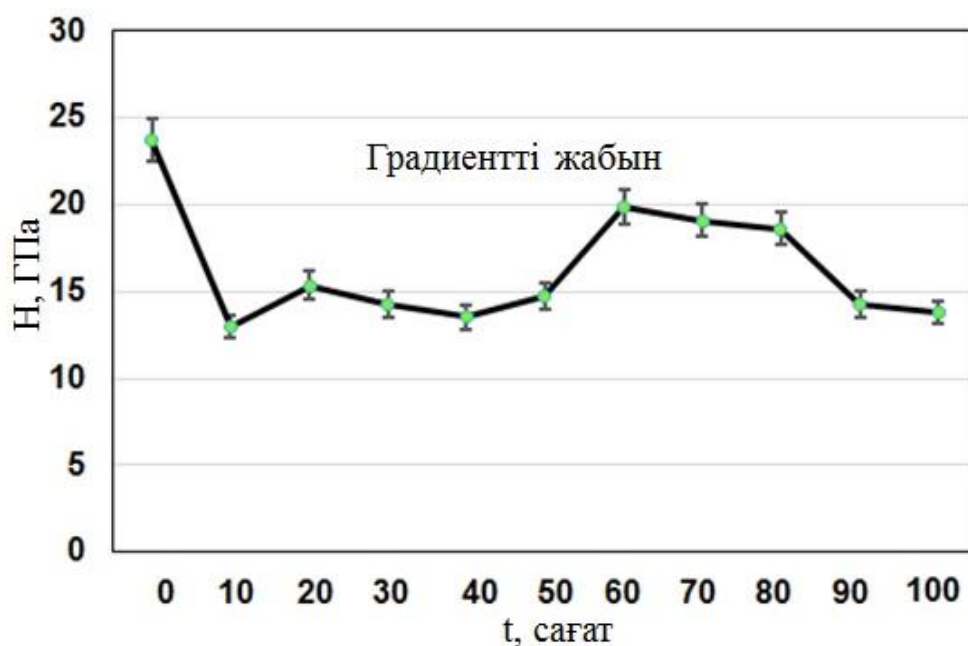


Сурет 66 - Градиентті жабынның біртекті жабындармен салыстырмалы ыстыққа төзімділік коэффициентінің уақытқа тәуелді графигі



Сурет 67 - Градиентті жабынның біртекті жабындармен салыстырмалы массалық ауытқуының уақытқа тәуелді графигі

68-суретте градиентті жабынның жоғары температурада уақытқа тәуелді микроқаттылығының өзгерісі бейнеленген. Жабынның микроқаттылығы бастапқы кезде 23 ГПа-дан артық мәнге ие болды, тұрақты температурада ұстау уақыты ұзарған сайын микроқаттылығы аздап азайып мөлшермен 13-19 ГПа аралығында болғанын көруге болады, бұл кезде жоғары температурада пеште ұзақ уақыт ұстаудың әсерінде жабында фазалық өзгеріс қатты туылмасада, үлгі бетіндегі кейбір дефектілер жойылу мүмкін немесе беттегі қуыстар аздап кеңеюі мүмкін деп болжауға болады.



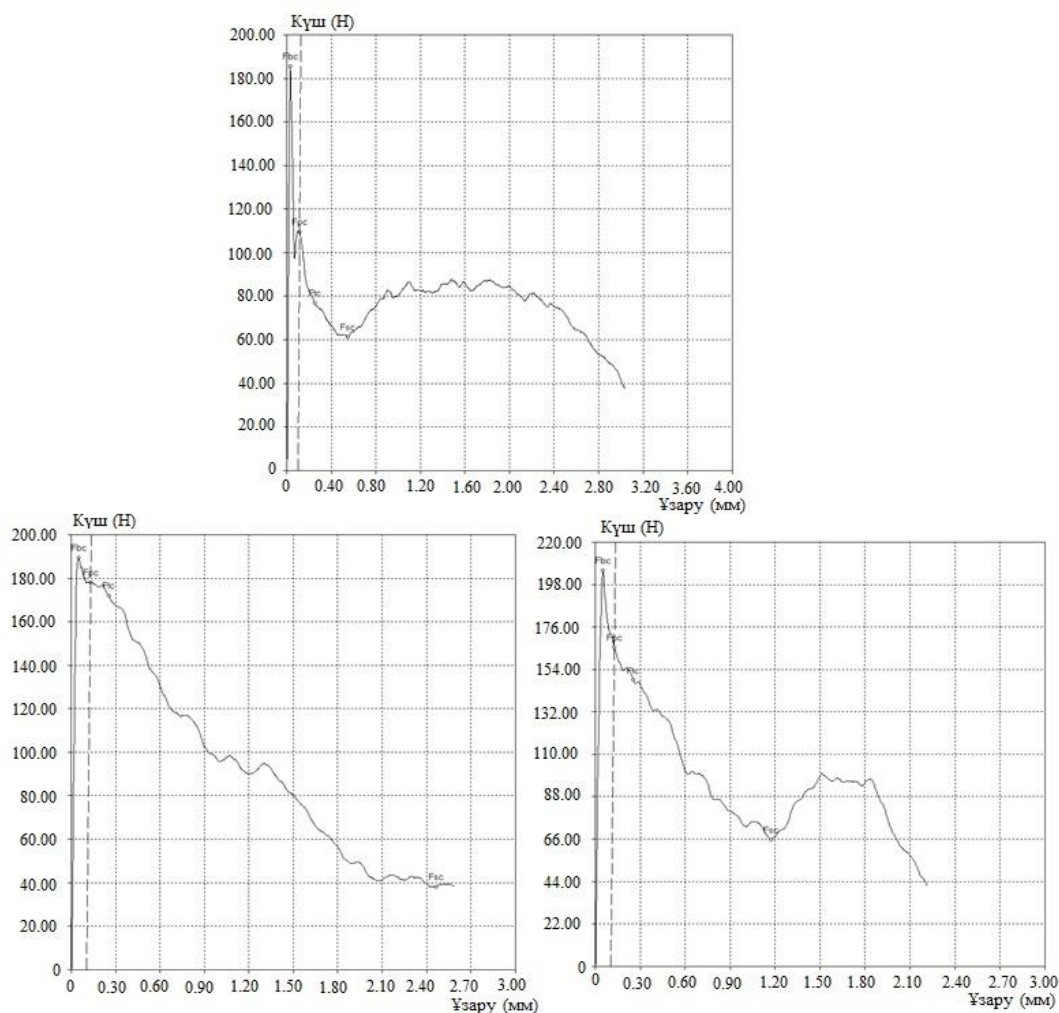
Сурет 68 - Градиентті жабынның біртекті жабындармен салыстырмалы микрөкаттылығының уақытқа тәуелді графигі

Кесте 17 - Жабынның адгезиялық беріктікке зерттеу нәтижесі

| Үлгі             | Диаметр, мм | Тарту жылдамдығы, мм/мин. | Беріктік шегі, МПа | Аққыштық шегі, МПа |
|------------------|-------------|---------------------------|--------------------|--------------------|
| 53%              | 2           | 0.5                       | 59.17              | 34.9               |
| 68%              | 2           | 0.5                       | 60.38              | 54.1               |
| Градиентті жабын | 2           | 0.5                       | 65.48              | 54.39              |

Жоғарыдағы кестеде (17-кесте) және төмендегі 69-суретте градиентті жабынның біртекті жабынмен салыстырмалы адгезиялық беріктікке тексеру нәтижелері бейнеленген, оқпанды жарылғыш газға толтыру мөлшері 53%, 68% және градиентті жабын үшеуі салыстырылып зерттелді, оқпанды 53%-ға толтырудан кейін ату жиілігі 0.25С пен 150 рет ату арқылы жабын қабаты алынды, келесі үлгіні оқпанды 68%-ға толтырудан кейін ату жиілігі 1С пен 150 рет ату арқылы алынды, келесі градиентті жабынды бастапқы 50 рет ауды 68%-ға толтырып 1С-пен, келесі 50 рет ауды 63%-ға толтырып 0.75С-пен, келесі 50 рет ауды 58%-ға толтырып 0.5С-пен және соңғы 50 рет ауды 53%-ға толтырып 0.25С-пен ату арқылы алдық, алынған жабындарды бөлме температурасында WDW-5 маркалы механикалық қасиетті тексергіш құрал көмегімен 0.5 мм/минут жылдамдықпен тарту градиентті жабынды біртекті жабындармен салыстырып адгезиялық беріктігі есептелініп, төмендегідей график алынды (Сурет 69). 53%-ға толтыру кезіндегі жабынның беріктік 59.17 МПа-ды, аққыштық шегі 34.9 МПа-ды көрсетті, 68%-ға толтыру кезіндегі жабынның

адгезиялық беріктігі 60.38 МПа-ды, аққыштық шегі 54.1 МПа-ді көрсетті және градиентті жабында беріктік шегі 65.48 МПа-ды, аққыштық шегі 54.39 МПа-ды көрсетті. Үш жабынды салыстырып қарасақ ең жоғары көрсеткіш 68%-дық толтырумен және градиентті жабында анықталды. Бұған қарай отрып төсеніш бетке жақын орналасқан бөлікте  $\gamma$ - $Al_2O_3$  фазаның көбірек болуы адгезиялық беріктікті жақсартатынын байқауға болады.



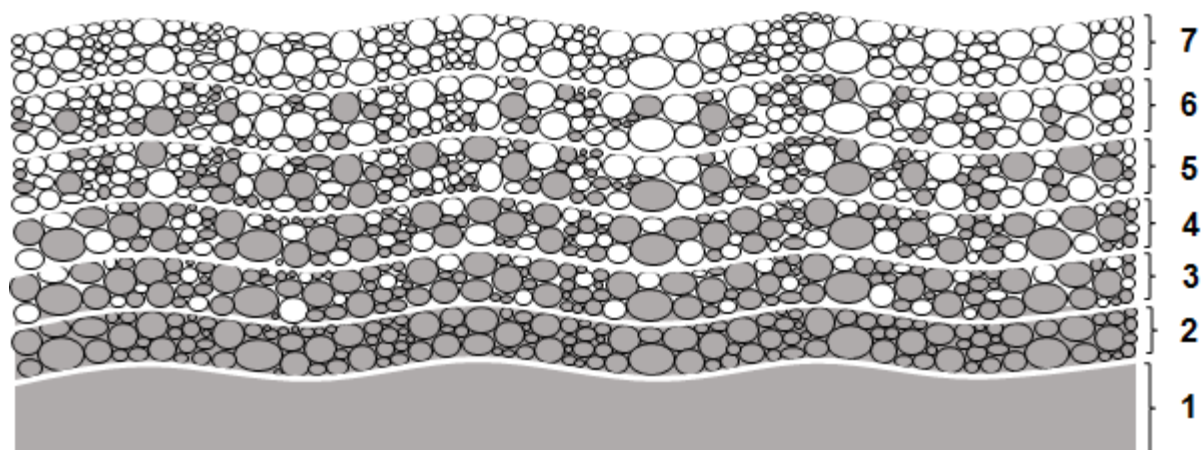
Сурет 69 – Градиентті жабынның біртекті жабындармен адгезиялық беріктігінің салыстырмалы нәтижесі

Бұл бөлімде детонациялық тозаңдау параметрлерін өзгерту арқылы, алюминий оксиді жабынының құрамындағы  $\alpha$ -фазамен  $\gamma$ -фазаның көлемдік үлесіне әсер етіп, төсенішке жақын бетте  $\gamma$ -фаза көбірек, беткі қабатқа қарай  $\alpha$ -фазаның мөлшері ұлғаятын градиентті жабын қабаты алынды, алынған градиентті жабынның физикомеханикалық қасиеті жақсарып, адгезиялық беріктігі артты және трибологиялық көрсеткіштері біртекті жабындармен салыстырғанда әлде қайда жоғары мәнге ие болды. Алғаш рет бізбен алюминий оксидінен градиентті жабын алудың тәсілі әзірленді. Бізді келесі бөлімде барлық дерлік жабындардың астыңғы қабатына төсеніш материалмен адгезиялық беріктікті арттыруға қолданылатын нихром ұнтағын қосып

араластыру арқылы градиентті жабын алу мүмкіндігі және жоғарыдағы алынған градиентті жабынның қасиеттерімен салыстыру ерекше қызығушылық тудырды.

#### 4.4 $\text{Al}_2\text{O}_3$ ұнтағына NiCr ұнтағын араластыру арқылы алынған градиентті жабынның құрылым-фазалық, механикалық және трибологиялық сипаттамаларын салыстыра зерттеу

NiCr және  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ұнтақтарының төсеніш материалға жағылу схемасы (Сурет 70), сондай-ақ көлденең қимасы, сәйкесінше, 71-суретте көрсетілген, Бет морфологиясын зерттеу қабаттың қалыңдығының ұлғаюы беттің кедір-бұдырлығының төмендеуіне әкеледі, бұл детонациялық әдістің тән сипаты болып табылады. Жабындардың көлденең қимасының нүктелік элементтік талдауы жүргізілді.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  жабынының элементтік құрамы туралы деректер 59-суретте көрсетілген. Детонациялық өндеу кезінде газ қоспасының элементтері жабын бетінде жоқ.



1 – Төсеніш; 2 – NiCr (100) % жабыны; 3 – NiCr +  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (80/20)% жабыны; 4 – NiCr +  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (60/40) % жабыны; 5 – NiCr +  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (40/60) % жабыны; 6 – NiCr +  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (20/80) % жабыны; 7 –  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (100) % жабыны

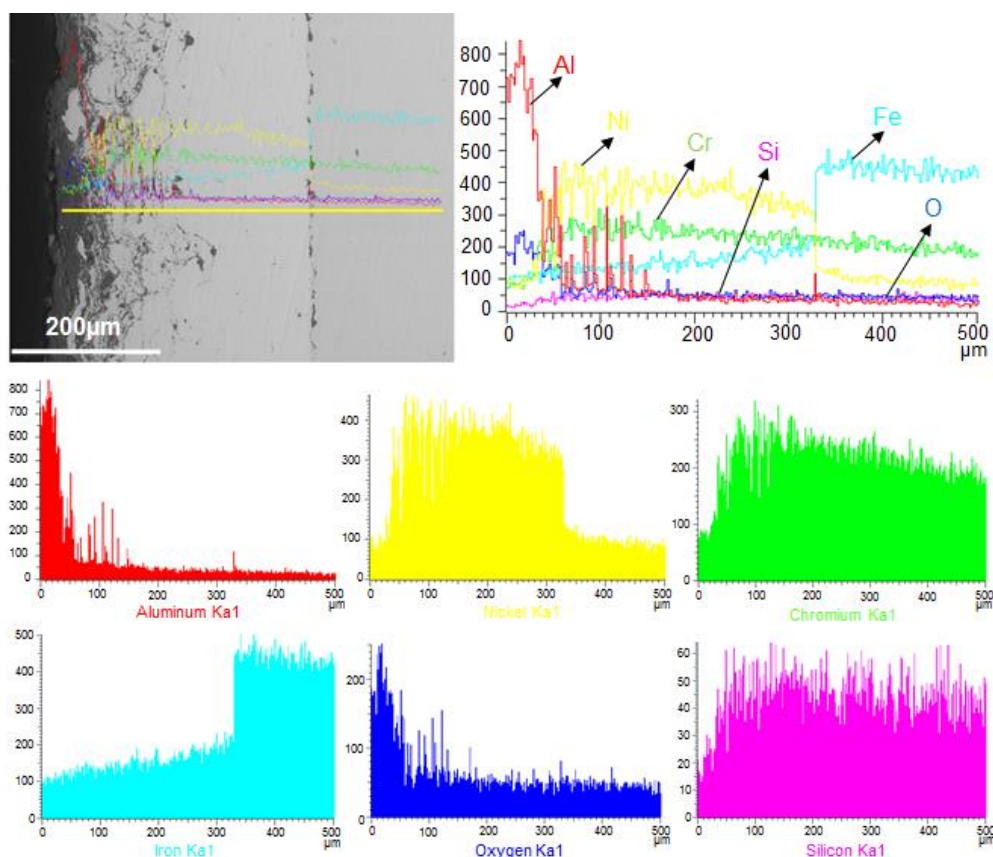
Сурет 70 – NiCr және  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ұнтақтарының төсеніш материалға жағылу схемасы

71 – суретте NiCr және  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ұнтақтарының түрлі қатынаспен яғни 1-төсеніш материалға 1-режим, 2-режим, 3-режим, 4-режим, 5-режим, 6-режим болып NiCr және  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ұнтақтары (1 – NiCr (100) % жабыны, 2 – NiCr +  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (80/20)% жабыны, 3 – NiCr +  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (60/40) % жабыны, 4 – NiCr +  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (40/60) % жабыны, 5 – NiCr +  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (20/80) % жабыны, 6 –  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (100) % жабыны) осы рет бойынша детонациялық әдіспен отырғызылу формасы бейнеленген (Қосымша В) [307]. 72-суретте растрлы электрондық микроскоп көмегімен көлденең қимасының суреті алынып оған тұтас (жалпылама) спектрлік талдау жасалынды (Кесте 18). Спектрлік талдау массалық үлес бойынша Ni, Fe, Cr элементтерінің көбірек екенін көрсетті. Себебі қапталған

жабын материалының және төсеніш материалының құрамында осы элементтер негізгі құрамды ұстайтыны белгілі. Сондай-ақ көлденең қимасы бойынша әрбір элемент үшін жеке-жеке кардиограммалық талдау жасалынды.

Кесте 18 – жабынның көлденең қимасынан түсірілген жалпы спектр бойынша нәтижесі (All results in weight %)

| Range          | O    | Al   | Si   | Cr    | Fe    | Ni    | Total  |
|----------------|------|------|------|-------|-------|-------|--------|
| Total spectrum | 7.15 | 7.26 | 0.36 | 17.78 | 27.22 | 40.23 | 100.00 |



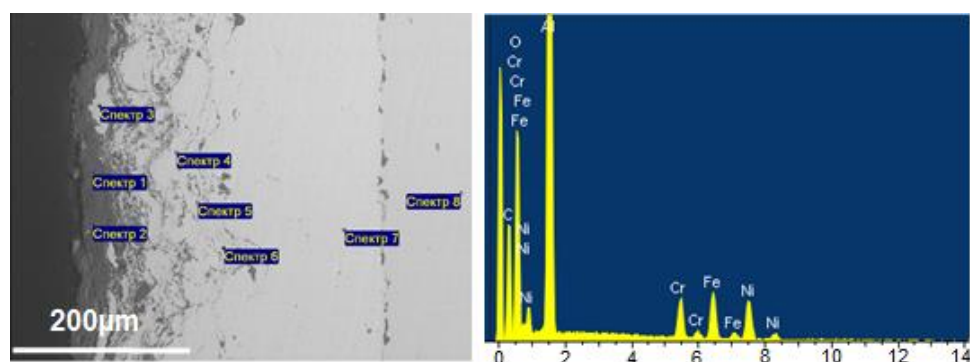
Сурет 71 – NiCr және Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> қоспа жабынының РЭМ бейнесі және ЭДС талдауы

72-суретте жабынның көлденең қимасынан 1 ден 6-режимге дейінгі аралықта әрқабат үшін нүктелік сынама алынды. Сынама нәтижесі 3-кестеде бейнеленген. 72-суретпен 19-кестені байланыстырып қарай отырып, беткі қабаттан төсеніш (подложка) материалға қарай Al элементінің массалық үлесі 39.08%-дан 1.71%-ға дейін азайғанын, O элементінің 34.59%-дан 4.15%-ға дейін азайғанын, Cr, Fe, Ni элементтерінің 5.80, 8.87, 11.66%-дан керісінше 18.31, 57.66, 18.16%-ға дейін артқанын көреміз. Элементтік талдау 1 ден 6-режимге дейінгі қатынас бойынша қосылған NiCr және Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ұнтақтарының мөлшерін дәлелді түрде көрсетті. Мақсат бойынша алынған градиентті жабынның

қалыптасуын тура бейнеледі. Сонымен бірге көлденең қимасынан түсірілген құрылым суретіне қарап әр қабаттың бір-бірімен тығыз қабыса орналасқанын аңғаруға болады [307].

Кесте 19 - жабынның көлденең қимасынан қабат (слой) бойынша түсірілген элементтік талдау нәтижесі (All results in weight %)

| Range   | O     | Al    | Si   | Cr    | Fe    | Ni    | Total  |
|---------|-------|-------|------|-------|-------|-------|--------|
| Range 1 | 34.59 | 39.08 |      | 5.80  | 8.87  | 11.66 | 100.00 |
| Range 2 | 30.11 | 36.13 |      | 7.45  | 13.15 | 13.16 | 100.00 |
| Range 3 | 5.79  | 5.43  |      | 19.67 | 5.96  | 63.15 | 100.00 |
| Range 4 | 9.02  | 7.80  |      | 18.38 | 9.21  | 55.59 | 100.00 |
| Range 5 | 6.41  | 3.63  | 0.70 | 19.23 | 12.10 | 57.93 | 100.00 |
| Range 6 | 6.03  | 3.43  |      | 17.41 | 16.73 | 56.39 | 100.00 |
| Range 7 | 4.73  | 2.32  |      | 18.65 | 22.38 | 51.92 | 100.00 |
| Range 8 | 4.15  | 1.71  |      | 18.31 | 57.66 | 18.16 | 100.00 |
| Max.    | 34.59 | 39.08 | 0.70 | 19.67 | 57.66 | 63.15 |        |
| Min.    | 4.15  | 1.71  | 0.70 | 5.80  | 5.96  | 11.66 |        |

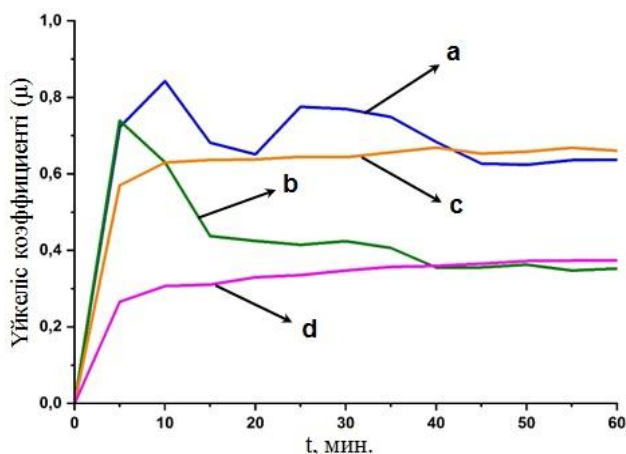


Сурет 72 – NiCr және  $Al_2O_3$  қоспа жабынының қабат (слой) бойынша РЭМ бейнесі және ЭДС талдауы

Төменде 73-суреттен төсеніш (подложка) материал а), NiCr жабыны б),  $Al_2O_3$  жабыны с) және градиентті жабынның трибологиялық зерттеу нәтижесі салыстырылып көрсетілген. «Профилометр 130» көмегімен салынған іздің қажалу тереңдігі анықталды (73 және 74 суретте). Трибологиялық сынау үйкеліс коэффициентінің орташа мәні төсеніште  $\mu \approx 0.669$  -ды, ойықтың тереңдігі  $h=8.82$  мкм-ді, NiCr жабыны  $\mu \approx 0.401$ -ді, ойықтың тереңдігі  $h=16.67$  мкм-ді,  $Al_2O_3$  ұнтағымен қапталған жабынның үйкеліс коэффициенті орташа мәні  $\mu \approx 0.603$ -ді, ойықтың тереңдігі  $h=0.44$  мкм-ді және градиентті көп қабатты жабын (1 ден 6-режим) материалының үйкеліс коэффициенті орташа мәні  $\mu \approx 0.355$ -ді, ойықтың тереңдігі  $h=0.54$  мкм-ді құрады. Салыстырып қарағанда төсеніш материалдың үйкеліс коэффициентінің мәні NiCr жабынымен салыстырғанда 0.268 ге көбірек болды,  $Al_2O_3$  жабынының үйкеліс коэффициенті төсеніш материалдікіне жуық болды, градиентті жабынның үйкеліс коэффициенті төсеніш материалмен және  $Al_2O_3$  жабынымен



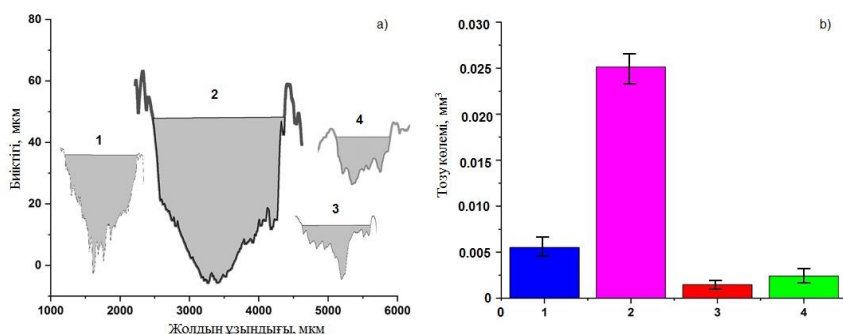
салыстырғанда 2 еседей аз болды. Үйкеліс коэффициентінің аздығы жабынның беріктік сапасының жоғары екенін көрсетеді [307].



а-Төсеніш; б-NiCr жабыны; с-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> жабыны; д-градиентті жабын

Сурет 73 - Төсеніш пен жабындардың салыстырмалы трибологиялық зерттеу нәтижесі

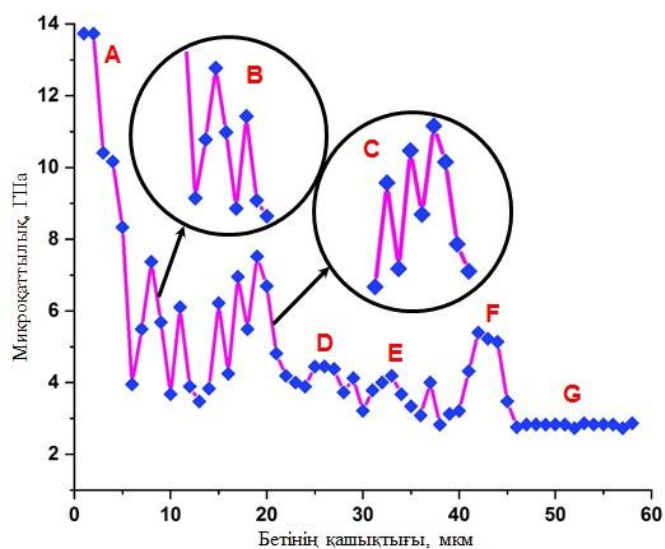
74-а,б суреттердегі профилометрлік зерттеу нәтижесіне қарап және жоғарыдағы 5-суретпен байланыстыра талдау жасасақ NiCr жабынының үйкеліс коэффициенті төсеніш материалға қарағанда аз болғанымен, ойықтың ауданының 5 есеге үлкен екенін (74,а суретте) яғни (74,б суретте) сәйкесінше тозу ізінің мәнінің салыстырмалы графигіненде айтарлықтай 5 есе жоғары екенін көреміз, ал Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> жабынының үйкеліс коэффициенті градиентті жабындыкімен салыстырғанда 2 есеге жуық артқанымен, ойықтың ауданына немесе тозу ізінің мәніне (74 а,б сурет) жуық болды [307]. Осы алынған нәтижелерге сүйеніп алюминий оксидіне жалғағыш қабат (подслой) ретінде қосылатын NiCr ұнтағын белгілі бір қатынаспен қосып, градиентті көп қабатты жабын алудың тиімді екені байқалды (Қосымша В).



1-Төсеніш; 2-NiCr жабыны; 3-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> жабыны; 4-градиентті жабын

Сурет 74 -Төсеніш пен жабындарды трибологиялық зерттеуден кейінгі ойығын профилометрмен сканерлеу арқылы тұрғызылған салыстырмалы графигі

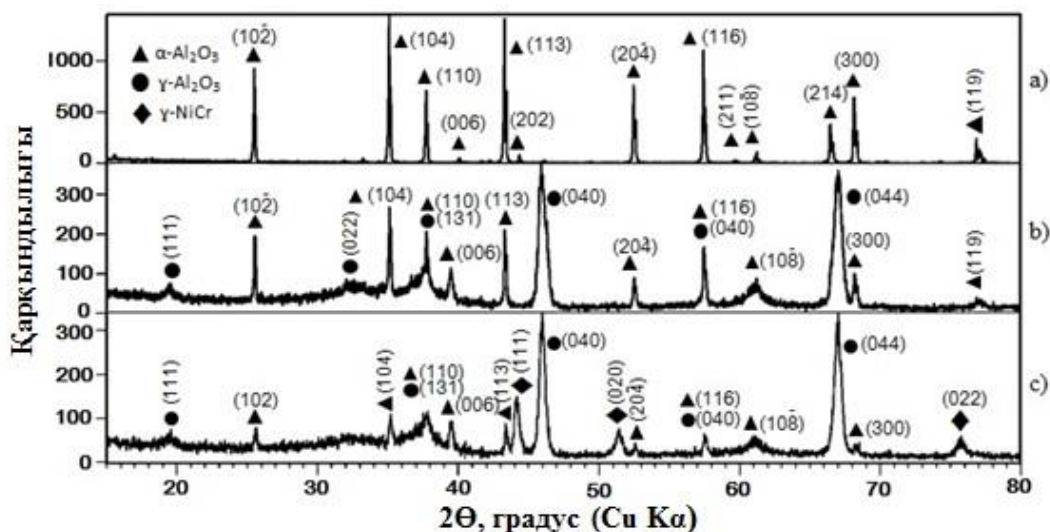
75-суретте көлденең қимасынан 15 градус бойынша беткі жабыннан (А) төсеніш материалға (G) дейін микроқаттылығының өзгерісі бейнеленген. 75-суреттегі А бөлігі 6-режим бойынша алынған яғни 100% алюминий оксиді жағылған аймақ, бұл аймақта микроқаттылығы 13.7 ГПа-ды, Б бөлігі 5-режим бойынша NiCr/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (20/80) қатынаспен алынған жабынның микроқаттылығы 7.5 нан 3.4-ГПа азайса, С бөлігінде 4-режим (40/60) қатынаспен алынған жабынның микроқаттылығы керісінше 3.4 тен 7.5 ГПа-ға дейін артқанын көрінді, Б мен С бөліктен Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ұнтағының дозасының көптігі микроқаттылықты арттыратынын байқауға болады, Д, Е бөлікте яғни 3 және 2-режимде NiCr/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (60/40) және (80/20) қатынаспен алынған жабынның микроқаттылығы керісінше 3-4 ГПа аралығында болды, себебі: бұл бөліктерде NiCr ұнтағының мөлшері Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> –ке қарағанда салыстырмалы көп болғандықтан микроқаттылықтары бір-біріне жуық болды, F бөлігінде яғни 1-режимде микроқаттылығы 2 мен 3-режимге қарағанда 5 ГПа-ға көтерілгенін көреміз. Бұның себебі: бұл жерде біріншіден 100% нихром (NiCr) ұнтағы жабылды, екіншіден төсеніш материалдың бетінің кедір-бұдырлығы, температура градиенті әсер етті деп болжауға болады. Соңғы G бөлігінде микроқаттылығы тұрақты 2.8 ГПа-ды көрсетті, яғни бұл бөлік төсеніш (подложка) материал [307].



Сурет 75 – Жабынның көлденең қимасы бойынша микроқаттылығының өзгерісі

Жоғарыдағы 75-суреттегі микроқаттылықтың өзгерісін, төмендегі 76-суреттегі алюминий оксидінің ұнтақ күйінің (а), детонациялық тозаңдаудан кейінгі күйінің (б) және 1-ден 6-режимге дейінгі алынған градиентті жабынның салыстырмалы рентгенфазалық талдау нәтижесімен салыстырып қарасақ, ұнтақ күйінде (76,а суретте) R-3с гексагональды  $\alpha$ -тордан тұратындығы, детонациялық тозаңдаудан кейін жабынның текшелері жартылай  $\gamma$ -кубтық торға (76,б суретте) ауысқанын және көлденең қимасынан түскен градиентті жабынның (1 ден 6-режимге дейін) дифрактограмма сызығына (76,с суретте) қарап алюминийдің  $\alpha$  мен  $\gamma$  фазаларның, сондай-ақ  $2\theta=44-45^\circ$ ,  $51-52^\circ$  және  $74-$

75° аралығында  $\gamma$ -(111),  $\gamma$ -(020) және  $\gamma$ -(022) кубтық торлы нихром (NiCr) фазаның пайда болғаны анықталды [307].



а) бастапқы б)детонациялық жабынның с)градиентті жабынның

Сурет 76 – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ұнтағының рентген дифрактограммасы

Фазалық ауысу детонациялық оқпаннан (детонационный ствол) ұшып шыққан балқытылған ыстық ұнтақ бөлшектер төсенішке (подложка) келіп жабысқан кезде салқындау орын алады, оқпаннан ыстық балқытылған бөлшектерді атқылау бірнеше марте жоғары жылдамдықпен (1000 м/с) қайталанады, осы процес кезінде төсеніш бетіне жағылған ыстық балқытылған бөлшектер біртіндеп суый бастайдыда, келесі жоғары жылдамдықпен келіп ұрылған (жағылған) ұнтақ суып үлгіре қоймаған жабынмен соқтығысып деформацияланады. Қуыстар толығымен жабылып (бітеліп) нәтижесінде беттік тығыз әрі берік жабын қабаты түзіледі. Балқытылған ыстық бөлшектің жоғары жылдамдықпен төсеніш материалға келіп соқтығысуы кезіне баяу салқынау жүріп  $\alpha \rightarrow \gamma$  фазалық алмасу орын алады, яғни детонациялық жарылыстың әсерімен төсеніш (подложка) материалының бетіне келіп соқтығысып (тежелу кезінде алған удардың әсерінде), біртіндеп суу барысында болатын кристалдық тордағы өзгеріспен түсіндіріледі. Оқпанға (ствол) толтырылған газ қоспасының мөлшері, жабын материалына таңдалған ұнтақтың өлшемі, төсеніш материалымен оқпан арасындағы арақашықтық, ұнтақты тозаңдау жылдамдығы қатарлылардың барлығы фазалық алмасуға тікелей әсер етеді.

### Бөлім бойынша қорытынды

Бұл тарауда ату жиілігін 1 секундтан 0,25 секундқа, детонациялық оқпанды газға толтыру мөлшерін 53-68% аралығында өзгерте отырып бірғана дозатор ақылы алынған алюминий оксиді негізіндегі жабынның құрылым-фазалық және трибомеханикалық қасиеттеріне детонация параметрлерінің әсері зерттелді, сондай-ақ  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> және  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> фазалық өзгерісін реттеуге болатындығына көз

жеткізілді, сол арқылы алюминий оксидінің өзінен және оған нихром ұнтағын қосу арқылы физико-механикалық және трибологиялық қасиеттері жақсартылған градиентті жабын алудың әдіс-тәсілі ойлап табылды. Осы негізде алынған зерттеу нәтижелері бойынша төмендегідей қорытынды жасалынды:

Ату жиілігінің азаюымен қаттылығы 16,33 ГПа және модуль Юнгі 270,64 ГПа болатын  $Al_2O_3$  негізінде жабын алынды. Атулар арасындағы кідіріс уақытын 0,25 с дейін азайту кезінде қаттылықтың жоғарылауының негізгі себебі фазаның  $\alpha-Al_2O_3$  көлемдік үлесінің артуымен байланысты болды. Рентгенқұрылымдық зерттеулер  $\alpha$ -фазаның ең көп құрамына шамамен 0,25 секундтық ату жиілігімен жабынды қалыптастыру кезінде қол жеткізілді (Қосымша Б). Осылайша, ату жиілігін өзгерте отырып,  $Al_2O_3$  негізіндегі жабындардың фазалық құрамын және тиісінше жабындардың қасиеттерін басқаруға болады.

$Al_2O_3$  ұнтағын детонациялық тозаңдаудан кейін жабын  $\alpha-Al_2O_3$  және  $\gamma-Al_2O_3$  екі фазадан тұрды және олардың көлемдік үлесі тозаңдаудың технологиялық режиміне қатты тәуелді екені анықталды. Оқпан 53% толтырылған кезде алынған жабын жоғары тозуға төзімді. Рентгендік дифракциялық талдау негізінде алюминий оксиді негізіндегі жабындарда  $\alpha-Al_2O_3$  фазаларының көлемдік үлесінің артуы олардың тозуға төзімділігінің артуына әкелетіні анықталды.  $Al_2O_3$  негізіндегі детонациялық жабынның жоғары қаттылығы мен тозуға төзімділігін қамтамасыз ету үшін  $\alpha-Al_2O_3$  көлемдік үлесін арттыру қажет.  $Al_2O_3$  жабынының жоғары физико-механикалық және трибологиялық қасиетке ие болуы 53 пайыздық толтыру кезінде болды. Микроқаттылығы ең жоғары мәні 20.6 ГПа-ға жетті, басқада толтырулармен салыстырғанда 3-4 ГПа-ға жоғары, төсеніш материалымен салыстырғанда тозу көлемі 2-2.5 есеге аз болды, эрозияға төзімділігі 2-3 есе жоғары және абразивті тозуға төзімділігі 4 есеге жуық жоғары болды (Қосымша Г).

Детонациялық оқпанды газға толтыру пайызын 68 ден 53%-ға дейін өзгерте отырып, алюминий оксиді негізіндегі жабынның  $\alpha-Al_2O_3$  және  $\gamma-Al_2O_3$  торларының қалыптасуын реттей отырып, берік әрі тығыз градиентті жабын қабатын алудың үйлесімді режимі анықталды. Алюминий оксиді жабынының микроқаттылығы оқпандағы газдың мөлшерінің 68 ден 53%-ға және ату жиілігін 1с тан 0.25с-қа азайту кезінде алынған градиентті жабынның микроқаттылығы ең жоғары мәні 23.73 ГПа-ды көрсетті. Алынған алюминий оксидінен тұратын градиентті жабынды трибологиялық зерттеудің нәтижесі үйкеліс коэффициентінің мәні басқа жабындармен салыстырғанда 50%-ға жуық аз көрсетті, сондай-ақ абразивті тозуға тұрақтылық коэффициентінің мәні төсеніш материал және стандартты материалмен (болат 45) салыстырғанда 6-7 есе жоғары болды, яғни осы алынған градиентті жабынның тозуға беріктігін көрсетеді. Ыстыққа төзімділікке зерттеу градиентті жабынның әдеттегі жабынмен салыстырғандағы температураға тұрақтылық коэффициентінің мәні бірқалыпты, өзгерссіз қалды. Біз детонациялық тозаңдау параметрлеріне өзгеріс енгізе отырып алюминий оксидінің  $\alpha$  және  $\gamma$  фазалы күйін реттей алдық, сол арқылы сапалы градиентті жабын қабатын алдық.

Біз нихром (подслой) ұнтағына  $Al_2O_3$  ұнтағын (0-100%) қатынаспен арнайы дирменде араластра отрып, бірғана дозатор көмегімен бір уақытта детонациялық тозаңдау арқылы бір-бірімен шекара бетімен бөлінбейтін  $Al_2O_3$ -NiCr градиентті жабын қабатын алдық, ол Қазақстан Республикасының жеке меншіктік патенті пайдалы моделімен қорғалды. Алынған жабындарды трибологиялық зерттеудің салыстырмалы нәтижесі көрсеткендей төсеніш материалдың үйкеліс коэффициентінің мәні NiCr жабынымен салыстырғанда 0.268 ге көбірек болды, градиентті жабынның үйкеліс коэффициенті төсеніш материалмен және  $Al_2O_3$  жабынымен салыстырғанда 2 есеге аз болды. Градиентті жабынды беткі қабаттан төсеніш (подложка) материалға қарай көлденең қимасынан микроқаттылығының өзгерісі анықталып, 100% алюминий оксиді жағылған аймақта микроқаттылығы 13.7 ГПа-ды, 5-режим бойынша NiCr/ $Al_2O_3$  (20/80) қатынаспен алынған жабынның микроқаттылығы 7.5 дан 3.4-ГПа-ға азайса, 4-режим (40/60) қатынаспен алынған жабынның микроқаттылығы керісінше 3.4 тен 7.5 ГПа-ға дейін артқаны анықталды,  $Al_2O_3$  ұнтағының дозасының ұлғаюуымен микроқаттылықтың артқанын байқауға болады, 3 және 2-режимде NiCr/ $Al_2O_3$  (60/40) және (80/20) қатынаспен алынған жабынның микроқаттылығы керісінше 3-4 ГПа аралығында болды, себебі: бұл бөліктерде NiCr ұнтағының мөлшері  $Al_2O_3$ -ке қарағанда салыстырмалы көп болғандықтан микроқаттылықтары бір-біріне жуық болды, 1-режимде микроқаттылығы 2 мен 3-режимге қарағанда 5 ГПа-ға өскені байқалды. Төсеніш материалмен салыстырғанда микроқаттылығы жалпы 4.9 есе жоғарлады (Қосымша В).

3 және 4 тарау бойынша алынған нәтижелердің қорытындысы негізде яғни жылулық өндеудің және детонациялық тозаңдау параметрлерін өзгерту арқылы алюминий оксиді негізіндегі жабынның фазалық өзгерісін тудырып, құрамындағы  $\gamma-Al_2O_3$  және  $\alpha-Al_2O_3$  фазалардың мөлшерін реттей отрып, соңында бірғана дозатор көмегімен физика-механикалық және трибологиялық қасиеті жақсартылған алюминий оксидінің өзінен градиентті жабын алынды, алынған зерттеу жұмыстары Қазақстан Республикасының екі пайдалы модельге патентімен қорғалды, бір өндіріске енгізіу актсі алынды, сонымен қатар диссертациялық жұмыстың толық эксперименттік нәтижелері Д.Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан университетінің «Техникалық физика» мамандығы бойынша «Материалдарды модификациялаудың технологиялық үрдісін жасау және енгізу», «Ионды-сәулелік технологиялардың қазіргі заманғы мәселелері» пәндерін оқытуда қолдануға ендіру актсі алынды (Қосымша F).

## ҚОРЫТЫНДЫ

Диссертацияда алюминий оксиді негізіндегі жабынның құрылым-фазалық және физика-механикалық қасиеттерінің ату жиілігі, оқпанды толтыру көлемі және термиялық күйдіру секілді тозаңдаудың технологиялық көрсеткіштеріне тәуелділігі зерттелді. Қаттылығы және тозуға төзімділігі жоғары, сонымен қатар адгезиялық беріктігі бар алюминий оксидінің градиентті жабынын жағу әдісі әзірленді.

Кешенді жүргізілген тәжірибелік зерттеу нәтижелері бойынша келесі қорытындылар жасауға болады:

1. Жүргізілген әдеби талдау нәтижесінде алюминий оксиді негізінде алынған детонациялық жабындардың физика-механикалық қасиеттерін арттыру мәселесін түбегейлі шешудің бірден бір жолы  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  фазасының көлемдік үлесін арттыру екендігі белгілі болды.

2. Корунд ( $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ұнтағын детонациялық тозаңдау кезінде қаптаманың негізгі фазасы  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  және аз мөлшерде  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  тұратындығы анықталды. Алюминий оксиді негізіндегі жабынды 1000-1200°C температурада жылулық өңдеу барысында  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  және  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  фазаларының көлемдік үлесінің өзгеруі жабынның құрылым-фазалық түрленуіне әкелетіндігі зерттелді. Жылулық өңдеуге дейін  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  фазасының мөлшері 79% болса, 1000°C және 1100°C температурада жылулық өңдеуден кейін  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  фазасының мөлшері сәйкесінше 29 және 13% құрайды. 1200°C температура жылулық өңдеуден кейін  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  фазасы толығымен  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  фазасына өтеді.  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  фазасы көлемдік үлесінің ұлғаюы алюминий оксиді негізіндегі жабын қаттылығының жоғарылауына әкелетіні анықталды.

3. Алюминий оксиді негізіндегі жабынның құрылым-фазалық күйі детонациялық тозаңдаудың технологиялық режимдеріне тәуелді екендігі анықталды.  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  және  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  фазаларының қатынасы ату жиілігіне және оқпанды толтырылу дәрежесіне байланысты өзгертіндігі анықталды. Ату жиілігін 1-ден 0,25 с-қа дейін төмендету –  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ -нің көлемдік үлесін 24-тен 34%-ға дейін арттыруға әкеледі. Оқпанды толтыру дәрежесін 68%-дан 53%-ға дейін азайту –  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  фазасының көлемдік үлесін 12-ден 24%-ға дейін арттырады.

4. Оқпанды толтыру дәрежесін 68%-дан 53%-ға дейін төмендету алюминий оксиді негізіндегі жабындардың физика-механикалық қасиеттерін жақсартатыны анықталды. Оқпанды толтырылу дәрежесін 68%-дан 53%-ға дейін төмендеткен жағдайда микроқаттылық 1,5 есе артып, тозу төзімділігі 2,5 есе төмендейтіндігі белгілі болды. Оқпанды толтыру дәрежесі 53%-ға тең болған жағдайда алынған жабындардың қаттылығы мен тозуға төзімділігінің жоғары мәндері  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ -фазасының жоғары мөлшерімен байланысты екені зерттелді.

5. Детонациялық оқпанды жарылғыш қоспамен толтыру дәрежесін 68%-дан 53%-ға дейін біртіндеп төмендету арқылы алюминий оксиді негізіндегі градиентті жабын алу әдісі әзірленді. Аталмыш әдіс  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  фазасы төсеніштің бетіне қарай артатын градиентті құрылымды алюминий оксиді жабынын алуға

мүмкіншілік береді. Градиентті және біртекті жабындардың салыстырмалы зерттеулері градиентті жабынның қаттылығы, тозуға және ыстыққа төзімділігі, сонымен қатар адгезиялық беріктілігі жоғары екенін көрсетті. Градиенттік жабынның жоғары дәрежедегі қаттылығы мен тозуға төзімділігі жабындардың беткі қабатындағы көп мөлшердегі  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  фазасына, ал жоғары адгезиялық беріктік төсеніш маңындағы  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  фазасының көп мөлшерде болуына байланысты.

**Қойылған міндеттердің толықтай шешілуін бағалау.** Диссертацияда қойылған міндеттердің барлығы толығымен шешілді. Барлық жоспарланған, күрделі, тәжірибелік жұмыстар орындалды және алынған нәтижелерге салыстырмалы талдау ғылыми кеңесшілермен және әріптестермен бірге жүргізілді. Детонациялық әдісті пайдаланып алюминий оксиді негізіндегі жабын қабаты алынып, жабындарының құрылымы, физика-механикалық, трибологиялық қасиеттері толыққанды зерттелді. Химиялық байланыстардың микроқұрылымы, элементтерінің концентрациясы және олардың жабында тереңдігі бойынша таралуын талдау бойынша зерттеулер кешені жүргізілді. Сонымен бірге жылулық өңдеудің және детонациялық тозандау параметрлерінің жабынның құрылым-фазалық және трибомеханикалық қасиеттерінің өзгерісіне әсері зерттелініп салыстырмалы талдаулар жасалынды.

**Диссертациялық жұмыстың нәтижелерін қолдану бойынша ұсыныстар.** Оқпанды жарылғыш газға толтыру мөлшерін және ату жылігін азайту арқылы алынған алюминий оксиді негізіндегі жабында пайда болатын пайдалы өзгерістер, сондай-ақ детонациялық тозандау параметрлерін өзгерту құралдың жұмыс істеу мерзімін ұзартуға, металл бұйымдарының бетінің микроқаттылығын, тозуға, ыстыққа және коррозияға төзімділігін арттыруда пайдалануға мүмкіндік береді.

**Диссертациялық жұмыстың ғылыми деңгейін бағалау.** Диссертациялық жұмыстың жоғары деңгейі зерттеу нәтижелерінің Д.Серікбаев атындағы ШҚТУ, С.Аманжолов атындағы ШҚУ және Вроцлав политехникалық университетінің (Польша) мамандандырылған зертханаларындағы өте жақсы сыннан өткен, өзара бірін-бірі толықтырушы, озық эксперименттік әдістер арқылы алынуымен бағаланады. Сонымен қатар, әдебиеттік шолуда әлемнің жетекші ғалымдарының заманауи еңбектері қамтылды. Алынған мәліметтер белгілі ең жоғары жетістіктермен салыстырылып талданды. Алғаш рет керамикалық ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) градиентті жабындарды тозандаудың технологиялық режимдері анықталды, оларда қалыңдығы бойынша қасиеттерінің өзгеруі алюминий оксидінің фазалық құрамының өзгеруімен жүзеге асырылады, бұл жабындардың жоғары тозуға төзімділігі мен жақсы адгезиялық беріктік қасиеттерін қамтамасыз етуге мүмкіндік берді. Өзірленген әдістер оқпанды газға толтыру мөлшерімен ату арасындағы кідіріс уақытының өзгеруі есебінен бір бағаналы қондырғыларда бір дозатор арқылы градиенттік құрылымды жабынды алуға мүмкіндік берді.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  оксиді ұнтағымен дәнекерлегіш (подслой) NiCr ұнтағын түрлі қатынаспен араластыру арқылы бірғана дозатор арқылы, шегаралық бетпен бөлінбейтін бір-бірімен тығыз байланысқан градиентті жабын алудың технологиясы әзірленді. Алынған алюминий оксиді

негізіндегі градиентті жабындарды наноиндентирлеу және трибомеханикалық зерттеу нәтижелері жабынның жоғары қорғаныс қабілеттілігіне ие екенін көрсетті.

Қорытындылай келе, Вроцлав политехникалық университетінің қауымдастырылған профессоры, DSc, шетелдік кеңесші Paszkowski Maciej-ге, «С.Аманжолов атындағы ШҚУ» КЕАҚ қауымдастырылған профессоры, отандық жетекші Бауржан Корабаев Рахадилловқа, докторлық жұмыста жетекшілік еткендері үшін, эксперименттік жұмыстарды орындауға және жұмыстың нәтижелерін талқылауда көмектескені үшін ерекше алғысымды білдіремін.



## ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- 1 Хокинг М., Васантасри В., Сидки П. Металлические и керамические покрытия: Получение, свойства и применение. – Москва: Мир, 2000. – 518 с.
- 2 Cartier M., Polak T.A., Wilcox G.D. Handbook of Surface Treatments and Coatings / New York: ASME Press, 2003. – P. 412.
- 3 Ющенко К.А., Борисов Ю.С., Кузнецов В.Д., Корж В.М. Инженерія поверхні / Київ: Науковадумка, 2007. – 559 с.
- 4 Dobkin D.M., Zuraw M.K. Principles of Chemical Vapor Deposition / New York: Springer, 2003. – P. 284.
- 5 Erkens G., Vetter J., M€uller J., auf demBrinke, T., Fromme M., Mohnfeld A. Plasma-Assisted Surface Coating Processes, Methods, Systems and Applications. SulzerMetco / Munich: S€uddeutscherVerlagonpact GmbH, 2011. – P. 71.
- 6 Gladish G.G., Smurov I. Physics of Laser Materials Processing: Theory and Experiment / Springer Series in Materials Science. Book 146 New York: Springer, 2011. – P. 534.
- 7 Полонський Л.Г. Техніканापилення газотермічних покриттів (машиннастадіярозвитку) / Житомир: Житомирський державний технологічний університет, 2004. – 266 с.
- 8 Berndt C.C. The origin of thermal spray literature / Proceedings of the international thermal spray conference // Ohio: ASM International. – Singapore, 2001. – P. 1351–1360.
- 9 Guddeti R.R., Knight R. and Grossmann E.D., “Depolymerization of Polyethylene Using Induction-Coupled Plasma Technology” // Plasma Chemistry and Plasma Processing. – 2000. – №20 (1). – P. 37-63.
- 10 Patent 5,712 UK. Improvements in or connected with the coating of surfaces with metal, applicable also for soldering or uniting metals and other materials / M.U. Schoop. – 1910.
- 11 Patent 21,066 UK. An improved process of applying deposits of metal or metallic compound to surfaces / M.U. Schoop. – 1911.
- 12 Patent 28,001 UK. A method of producing bodies and coatings of glass and other substances / E. Morf – 1912.
- 13 Patent 1,133,507 US. Apparatus for spraying molten metal and other fusible substances / M.U. Schoop. – 1915.
- 14 Pawlowski L. The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings // 2-nd Ed. John Wiley & Sons, Ltd. – England, 2008. – P. 647.
- 15 Planche M.P., Bolot R., Coddet C. In-flight characteristics of plasma sprayed alumina particles measurements, modeling, and comparison // Journal of Thermal Spray Technology – 2003. – 12 (1). – P. 101–111.
- 16 Fauchais P., Heberlein J., Boulos M. Thermal Spray Fundamentals / New York: Springer, 2014. – P. 1600.
- 17 Шоршоров М.Х., Харламов Ю.А. Физико-химические основы детонационно-газового напыления покрытий / МОСКВА: Наука, 1978. – 224 с.

- 18 Харламов Ю.А., Шоршоров М.Х., Писклов Ю.И., Рябошапко Б.Л. Детонационно-газовая аппаратура для напыления покрытий. – Москва: Институт металлургии им. А.А. Байкова АН СССР, 1980. – 65 с.
- 19 Хусаи А., Моригако О. Наплавка и напыление / Пер. с яп. В.П. Попова; Под ред. В.С. Степанина, Н.Г. Шестерина. – Москва: Машиностроение, 1985. – 240 с.
- 20 Davis J.R. Handbook of Thermal Spray Technology. – Ohio: ASM International, 2004. – P. 347.
- 21 Filofteia-Laura Toma, Stefan Scheitz, Lutz-Michael Berger, etc Comparative Study of the Electrical Properties and Characteristics of Thermally Sprayed Alumina and Spinel Coatings // Journal of Thermal Spray Technology. – 2011. – Vol.20(1-2), – P. 195–204.
- 22 Балдаев Л.Х., Борисов В.Н., Вахалин В.А. и др. Газотермическое напыление / под ред. Л.Х. Балдаева. – Москва: Маркет, 2007. – 344 с.
- 23 Анциферов В.Н., Шмаков А.М., Агеев С.С., Буланов В.Я. Газотермические покрытия. – Екатеринбург: УИФ "Наука", 1994. – 320 с.
- 24 Pawlowski L. The Science and Technology of Thermal Spray Coatings: Second Edition // Chichester: JOHN WILEY & SONS. – 2008. – P. 67–107
- 25 Mishra N. K., Mishra S. B. and Kumar R. Oxidation Resistance of Low-Velocity Oxy Fuel-Sprayed Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-13TiO<sub>2</sub> Coating on nickel-Based Superalloys at 800°C // Surface and Coatings Technology. – 2014. – Vol.6, № 3. – P. 23–27
- 26 Zavareh M.A., Sarhan A.A.D.M., Razak B.B.A., Basirun W.J. Plasma thermal spray of ceramic oxide coating on carbon steel with enhanced wear and corrosion resistance for oil and gas applications // Ceramics International. – 2014. – Vol.40, № 9. – P. 14267 – 14277.
- 27 Girolamo G.D., Brentari A., Blasi C., Serra E. Microstructure and mechanical properties of plasma sprayed alumina-based coatings // Ceramics International. – 2014. – Vol.40, № 8. – P. 12861 – 12867.
- 28 Santos C., Coutinho I.F., Amarante J.E.V., Alves M.F.R.P., Coutinho M.M., Silva, C.R. M. Mechanical properties of ceramic composites based on ZrO<sub>2</sub> co-stabilized by Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – CeO<sub>2</sub> reinforced with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> platelets for dental implants // Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials. – 2021. – Vol.116, № 4. – P. 104372.
- 29 Chevalier J. What future for zirconia as a biomaterial // Biomaterials. –2006. – Vol.27, № 4. P. 535 – 543.
- 30 Jia S., Yong Z., Xu J., Wang J., Yu L. Effect of TiO<sub>2</sub> content on properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thermal barrier coatings by plasma spraying // Transactions Of Nonferrous Metals Society Of China. – 2015. – Vol.25, № 1. – P. 175–183.
- 31 Mamaeva A., Kenzhegulov A., Panichkin A., Alibekov Z., Wieleba W. Effect of Magnetron Sputtering Deposition Conditions on the Mechanical and Tribological Properties of Wear-Resistant Titanium Carbonitride Coatings // Coatings. – 2022. – Vol. 12, № 2. – P. 1-11.
- 32 Çelik İ. Structure and surface properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – TiO<sub>2</sub> ceramic coated AZ31 magnesium alloy // Ceramics International. – 2016. – Vol.42, № 12. – P. 13659–13663.

33 Zhang W.W., Li G.R., Zhang Q., Yang G.J., Zhang G.W., Mu H.M. Self-enhancing thermal insulation performance of bimodal-structured thermal barrier coating // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2018. – Vol.27, № 7. – P.1064 – 1075.

34 Elsen S.R., Ramesh T. Optimization to develop multiple response hardness and compressive strength of zirconia reinforced alumina by using RSM and GRA // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2015. – Vol.52. – P. 159 – 164.

35 Manojkumar P.A., Gandhi A.S., Kamaraj M., Thomas Paul V., Kumar N., Tyagi A.K. Role of nanocrystalline feedstock in the tribological behaviour of alumina coatings deposited by detonation gun // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2012. – Vol.35. – P. 108 – 114.

36 Yılmaz K. Effect of counterbody on the dry sliding wear performance of plasma sprayed calcia-stabilized zirconia coating // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2020. – Vol.92. – P. 105284.

37 Liu Y., Fischer T.E., Dent A. Comparison of HVOF and plasma-sprayed alumina titania coatings-microstructure, mechanical properties and abrasion behavior // *Surface and Coatings Technology*. – 2013. – Vol.167. – P. 68 – 76.

38 Nath S., Sinha N., Basu B. Microstructure, mechanical and tribological properties of microwave sintered calcia-doped zirconia for biomedical applications // *Ceramics International*. – 2008. – Vol.34. – P. 1509 – 1520.

39 Utu I.D., Marginean G., Hulka I., Serban V.A. Cristea D. Properties of the thermally sprayed  $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiO}_2$  coatings deposited on titanium substrate // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2015. – Vol.51. – P. 118 – 123.

40 Gou J., Zhang J., Zhang Q., Wang Y., Wang C. Effect of nano- $\text{Si}_3\text{N}_4$  additives and plasma treatment on the dry sliding wear behavior of plasma sprayed  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -8YSZ ceramic coatings // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2017. – Vol.26. – P. 764 – 777.

41 Nayak C., Ariharan S., Kushram P., Balani K. Fretting of aluminum oxide, hydroxyapatite and carbon nanotubes reinforced ultra high molecular weight polyethylene // *Journal of Mineral Metal and Material Engineering*. – 2018. – Vol.4. – P. 22 – 34.

42 Tucker Jr. C. *ASM Handbook. Thermal Spray Technology* // Ohio: ASM International. – 2013. – Vol.5A. – P. 412.

43 Friis M., Persson C. Control of thermal spray processes by means of process maps and process windows // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2003. – Vol.12 (1). – P. 44–52.

44 Wang Y., Li C., Guo L., Tian W. Laser remelting of plasma sprayed nanostructured  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{TiO}_2$  coatings at different laser power // *Surface and Coatings Technology*. – 2010. – Vol.204, № 21-22. – P. 3559 – 3566.

45 Дубнищев Ю.Н., Арбузов В.А., Белоусов П.П., Белоусов П.Я. Оптические методы исследования потоков. – Новосибирск: Сибирское университетское издательство, 2003. – 418 с.

- 46 Гуляев П.Ю., Долматов А.В. Физические принципы диагностики в технологиях плазменного напыления // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2009. – Т. 11, №5 (2). – С.381-385.
- 47 Yu J., Wang Y., Zhou F., Wang L., Pan Z. Laser remelting of plasma-sprayed nanostructured Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>- 20 wt.% ZrO<sub>2</sub> coatings onto 316 L stainless steel // Applied Surface Science. – 2018. – Vol.431, № 44. – P. 112–121.
- 48 de Freitas F.E., Brigunte F.P., Reis A.G.D, de Vasconcelos G., Reis D.A.P. Investigation on the microstructure and creep behavior of laser remelted thermal barrier coating // Surface and Coatings Technology. – 2019. – Vol.369. – P. 257 – 264.
- 49 Datskov V., Bleile A., Fischer E., Hess G. Conduction-cooled HTS current leads for the SIS100 corrector magnets // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2018. – Vol.28. – P. 4801803
- 50 Cubero A., Núñez-Chico A.B., Navarro R., Angurel L.A., Martínez E. Electromagnetic behaviour and thermal stability of a conduction-cooled, no-insulated 2G-HTS coil at intermediate temperatures // Cryogenics (Guildf). – 2020. – Vol.108. – P. 103070.
- 51 Deng W., Hou S. Li, G., Liu X., Zhao X., An Y., Zhou H., Chen J. Comparative study on wear behavior of plasma sprayed Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coatings sliding against different counterparts // Ceramics International. – 2017. – Vol.43. – P. 6976 – 6986.
- 52 Tingaud O., Bertrand P., Bertrand G. Microstructure and tribological behavior of suspension plasma sprayed Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-YSZ composite coatings // Surface and Coatings Technology. – 2010. – Vol.205 – P. 1004 – 1008.
- 53 Liu H., Tao J., Xu J., Chen Z., Gao Q. Corrosion and tribological behaviors of chromium oxide coatings prepared by the glow-discharge plasma technique // Surface and Coatings Technology. – 2009. – Vol.204, № 1. – P. 28 – 36.
- 54 Yang K., Feng J., Zhou X., Tao S. Microstructural characterization and strengthening-toughening mechanism of plasma-sprayed Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite coatings // Journal of Thermal Spray Technology. – 2012. – Vol.21. – P. 1011 – 1024.
- 55 Doubenskaia M., Novichenko D., Sova A. and Pervoushin D. Particle-in-flight monitoring in thermal spray processes // Surface and Coatings Technology. – 2010. – Vol. 205, № 4, P. 1092-1095.
- 56 Fauchais P., Vardelle M. Sensors in spray processes // Journal of Thermal Spray Technology. – 2010. – Vol. 19 (4). – P. 668–694.
- 57 Ariharan S., Nisar Ambreen, Balaji N., et al. Carbon nanotubes stabilize high-temperature phase and toughen Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-based thermal barrier coatings // Compos. BEng. – 2017. – Vol.124. – P. 76–87.
- 58 Yasin O., Kadir M.D., Abdullah C.K. Hot corrosion behavior of YSZ, Gd<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> and YSZ/Gd<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> thermal barrier coatings exposed to molten sulfate and vanadate salt // Applied Surface Science. – 2018. – Vol.438. – P. 96–113.
- 59 Yeh C.L., Li R.F. Formation of TiB<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and NbB<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composites by combustion synthesis involving thermite reactions // Chemical Engineering. – 2009. – Vol.147. № 2-3. – P. 405-411.

60 Jalaly M., Bafghi MS., Tamizifar M., Gotor FJ. Formation mechanism of  $ZrB_2-Al_2O_3$  nanocomposite powder by mechanically induced self-sustaining reaction // *Journal of Materials Science*. – 2013. – Vol.48, № 21. – P. 7557-7567.

61 Xiao GQ., Fu YL., Zhang ZW., Hou AD. Mechanism and microstructural evolution of combustion synthesis of  $ZrB_2-Al_2O_3$  composite powders // *Ceramics International*. – 2015. – Vol.41, № 4. – P. 5790-5797.

62 Toma F.L., Stahr C.C., Berge L.M., Saaro S., Herrmann M., Deska D., Michael G. Corrosion Resistance of APS- and HVOF-Sprayed Coatings in the  $Al_2O_3-TiO_2$  System // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2010. – Vol.19, № 1-2. – P.137–147.

63 Bolelli G., Bonferroni B., Cannillo V., Gadow R., Killinger A., Lusvarghi L., Rauch J., Stiegler N. Wear behaviour of high velocity suspension flame sprayed (HVSFS)  $Al_2O_3$  coatings produced using micron- and nano-sized powder suspensions // *Surface and Coatings Technology*. – 2010. – Vol.204, – P. 2657–2668.

64 Bolelli G., Cannillo V., Gadow R., Killinger A., Lusvarghi L., Manfredini T., Müller P. Properties of  $Al_2O_3$  coatings by High Velocity Suspension Flame Spraying (HVSFS): Effects of injection systems and torch design // *Surface and Coatings Technology*. – 2015. – Vol.270, – P. 175–189.

65 Rauch J., Bolelli G., Killinger A., Gadow R., Cannillo V., Lusvarghi L. Advances in High Velocity Suspension Flame Spraying // *Surface and Coatings Technology*. – 2009. – Vol.203. – P. 2131–2138.

66 Murray J.W., Ang A.S.M., Pala Z., Shaw E.C., Hussain T. Suspension High Velocity Oxy-Fuel (SHVOF)-Sprayed Alumina Coatings: Microstructure, Nanoindentation and Wear // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2016. – Vol.25. – P. 1700–1710.

67 Darut G., Ben-Ettouil F., Denoirjean A., Montavon G., Ageorges H., Fauchais P. Dry Sliding Behavior of Sub-Micrometer-Sized Suspension Plasma Sprayed Ceramic Oxide Coatings // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2010. – Vol.19. – P. 275–285.

68 Goel S., Björklund S., Curry N., Wiklund U., Joshi S. Axial suspension plasma spraying of  $Al_2O_3$  coatings for superior tribological properties // *Surface and Coatings Technology*. – 2017. – Vol.315. – P. 80–87.

69 Owoseni T.A., Murray J.W., Pala Z., Lester E.H., Grant D.M., Hussain T. Suspension high velocity oxy-fuel spray of delta-theta alumina suspension: Phase transformation and tribology // *Surface and Coatings Technology*. – 2019. – Vol.371. P. – 97–106.

70 Bolelli G., Cannillo V., Gadow R., Killinger A., Lusvarghi L., Rauch J., Romagnoli M. Effect of the suspension composition on the microstructural properties of high velocity suspension flame sprayed  $Al_2O_3$  coatings // *Surface and Coatings Technology*. – 2010. – Vol. 204. – P. 1163–1179.

71 Darut G., Klyatskina E., Valette S., Carles P., Denoirjean A., Montavon G., Ageorges H., Segovia F., Salvador M. Architecture and phases composition of suspension plasma sprayed alumina-titanium sub-micrometer-sized coatings // *Materials Letters*. – 2012. – Vol.67. – P. 241–244.

72 Vicent M., Bannier E., Carpio P., Rayón E., Benavente R., Salvador M.D., Sánchez E. Effect of the initial particle size distribution on the properties of suspension plasma sprayed  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  coatings // *Surface and Coatings Technology*. – 2015. – Vol.268. – P. 209–215.

73 Gadow R., Killinger A., Rauch J. New results in High Velocity Suspension Flame Spraying // *Surface and Coatings Technology*. – 2008. – Vol.202. – P. 4329–4336.

74 Killinger A., Gadow R., Mauer G., Guignard A., Vaßen R., Stöver D. Review of New Developments in Suspension and Solution Precursor Thermal Spray Processes // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2011. – Vol.20. – P. 677–695.

75 Bolelli G., Rauch J., Cannillo V., Killinger A., Lusvardi L., Gadow R. Microstructural and Tribological Investigation of High-Velocity Suspension Flame Sprayed  $\text{Al}_2\text{O}_3$  Coatings // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2009. – Vol.18, № 1. – P. 35–49.

76 Fauchais P., Etchart-Salas R., Rat V., Coudert J.F., Caron N., Wittmann-Ténèze K. Parameters Controlling Liquid Plasma Spraying: Solutions, Sols, or Suspensions // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2008. – Vol.17. – P. 31–59.

77 Toma F.L., Potthoff A., Barbosa M. Microstructural Characteristics and Performances of  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  and  $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-15\%TiO}_2$  S-HVOF Coatings Obtained from Water-Based Suspensions // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2018. – Vol.27. – P. 344–357.

78 Tingaud O., Bertrand P., Bertrand G. Microstructure and tribological behavior of suspension plasma sprayed  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-YSZ}$  composite coatings // *Surface and Coatings Technology*. – 2010. – Vol.205. – P. 1004–1008.

79 Gao H., Luo F., Wen Q., Jia H., Zhou W., Zhu D. Enhanced high-temperature dielectric and microwave absorption properties of SiC fiber-reinforced oxide matrix composites // *The Journal of Applied Polymer Science*. – 2018. – Vol.136. – P. 47097.

80 Mu Y., Zhou W., Hu Y., Wang H., Luo F., Ding D., Qing Y. Temperature-dependent dielectric and microwave absorption properties of SiC/SiC- $\text{Al}_2\text{O}_3$  composites modified by thermal cross-linking procedure // *The Journal of the European Ceramic Society*. – 2015. – Vol.35, № 11. – P. 2991–3003.

81 Zhou L., Chen M., Dong Y., Yuan Z., Johnson D. Enhanced dielectric and microwave absorption properties of Cr/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  coatings deposited by low-power plasma spraying // *Journal of the American Ceramic Society*. – 2016. – Vol.100. – P. 620–626.

82 Jia H., Zhou W., Nan H., Qing Y., Luo F., Zhu D. High temperature microwave absorbing properties of plasma sprayed  $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{FeO}_{3-\delta}/\text{MgAl}_2\text{O}_4$  composite ceramic coatings // *Ceramics International*. – 2020. – Vol.46. – P. 6168–6173.

83 Pastore R., Delfini A., Santoni F., Marchetti M., Albano M., Piergentili F., Matassa R. Space Environment Exposure Effects on Ceramic Coating for Thermal Protection Systems // *Journal of Spacecraft and Rockets*. – 2021. – Vol.107. – P. 2411–2502.

84 Aldabergenova T.M., Kislitsin S.B., Ganeev G.Z., Wieleba W. Thermal Annealing Effect on Structure and Properties of Tungsten Surface Irradiated with High Fluence and Low Energy Alpha-Particles // Russian Physics Journal. – 2018. – Vol. 61, № 8. – P. 1499 – 1505.

85 Zhou Y.-Z., Liu M., Yang K., Zeng W., Song J.-B., Deng C.-M., Deng C.-G. Microstructure and Property of  $\text{MoSi}_2\text{-30Al}_2\text{O}_3$  Electrothermal Coating Prepared by Atmospheric Plasma Spraying // International Journal of Inorganic Materials. – 2019. – Vol.34. – P. 646–652.

86 Хамзин Р.М. Влияние металлокерамического покрытия на износ цилиндровой втулки и поршневого кольца // Трение, износ, смазка. – 2000. – Т. 2, – № 1. С. 57–63.

87 Yang Y., Wang Y., Tian W., Yan D., Zhang J., Wang L. Nanocomposite powder with three-dimensional networkstructure for preparing alumina-titania nanocomposite coating with advanced performance // The Journal of Alloys and Compounds. – 2015. – Vol.622. – P. 929–934.

88 Wang Y., Bai Y., Liu K., Wang J.W., Kang Y.X., Li J.R., Chen H.Y., Li B.Q. Microstructural evolution of plasma sprayed submicron-/nano-zirconia-based thermal barrier coatings // Applied Surface Science. – 2016. – Vol.363. – P. 101–112.

89 Chen S., Xiang J., Huang J., Zhao X. Microstructures and properties of double-ceramic-layer thermal barrier coatings of  $\text{La}_2(\text{Zr}_{0.7}\text{Ce}_{0.3})_2\text{O}_7/8\text{YSZ}$  made by atmospheric plasma spraying // Applied Surface Science. – 2015. – Vol.340. – P. 173–181.

90 Vasiliev A.L., Padture N.P., Ma X. Coatings of metastableceramics deposited by solution-precursor plasma spray: I. Binary  $\text{ZrO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  system // Acta Materialia. – 2006. – Vol.54. – P. 4913–4920.

91 Yin Z.B., Yan S.Y., Ye J.D., Zhu Z.Y. and Yuan J.T. Cutting Performance of Microwave-Sintered Sub-Crystal  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiC}$  Ceramic Tool in Dry Cutting of Hardened Steel // Ceramics International. – 2019. – Vol.45, – P. 16113–16120.

92 Musfirah A.H., Haron C.H. and Ghani J.A. Tool Wear and Surface Integrity of Inconel 718 in Dry and Cryogenic Coolant at High Cutting Speed // Wear. – 2017. – Vol.376–377. – P. 125–133.

93 Su Y.F., Fan H.Z., Zhang Y.S., Hu T.C. and Hu L.T. Surface Engineering dEsign of Alumina/Molybdenum Fibrous Monolithic Ceramic to Achieve Excellent Lubrication in a High Vacuum Environment // Tribology Letters. – 2018. – Vol.320. – P. 66–72.

94 Niittymaki M., Lahti K., Suhonen T., and Metsajoki J. Dielectric Break down Strength of Thermally Sprayed Ceramic Coatings: Effects of Different Test Arrangements // The Journal of Thermal Spray Technology. – 2015. – Vol.24 (3). – P. 542-551.

95 Sadeghimeresht E., Markocsan N., New Yorklén P. Microstructural characteristics andcorrosion behavior of HVOF- and HVOF-sprayed Fe-based coatings // Surface and Coatings Technology. – 2017. – Vol.318. – P. 365–373,

96 Yin Z., Tao S., Zhou X. Effect of the thickness on properties of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  coatings deposited by plasma spraying // Materials Characterization. – 2010. – Vol.62. – P. 90–93.

- 97 Wang B., Lee S.W. Erosion-corrosion behaviour of HVOF NiAl-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> intermetallic-ceramic coating // *Wear*. – 2000. – Vol.239. – P. 83–90,
- 98 Pulci G., Tirillò J., Marra F., Sarasini F., Bellucci A., Valente T., Bartuli C. Hightemperature oxidation and microstructural evolution of modified MCrAlY coatings // *Metallurgical and Materials Transactions A*. – 2014. – Vol.45, № 3. – P. 1401–1408.
- 99 Abedi H.R., Salehi M., Shafyei A. Mechanical and thermal properties of double-layer and triple-layer thermal barrier coatings with different ceramic top coats on topolyimide matrix composite // *Ceramics International*. – 2017. – Vol.43 № 15. – P. 12770–12780.
- 100 Fauchais P., Vardelle A., Dussoubs B. Quo vadis thermal spraying // *Proceeding in International Thermal Spray Conference*. ASM International Materials Park. – Ohio: USA, 2001. – P. 32–40.
- 101 Kulkarni A., Gutleber J., Sampath S. etc. Studies of the microstructure and properties of dense ceramic coatings produced by high velocity oxygen fuel combustion spraying // *Materials Science and Engineering*. – 2004. – Vol.369. – P. 124–137.
- 102 Ma X.Q., Roth J., Gandy D.W., Frederick G.J. A New High-Velocity Oxygen Fuel Process for Making Finely Structured and Highly Bonded Inconel Alloy Layers from Liquid Feedstock // *Thermal Spray Technol*. – 2006. – Vol.15. – P. 670–675.
- 103 Killinger A., Kuhn M., Gadow R. High-Velocity Suspension Flame Spraying, a new approach for spraying nanoparticles with hypersonic speed // *Surface and Coatings Technology*. – 2006. – Vol.201. – P. 1922–1929.
- 104 Bolelli G., Cannillo V., Lusvardi L., etc. Wear Behavior of APS and HVOF Sprayed Ceramic Coatings // *Proceedings of the 2006 International Thermal Spray Conference*. – Seattle: Washington., 2006. – P. 15–18.
- 105 Li J.F., Liao H., Wang X.Y., Normand B., Ji V., Ding C.X., Coddet C., Improvement in wear resistance of plasma sprayed yttria stabilized zirconia coating using nanostructured powder // *Tribology International*. – 2004. – Vol. 37. – P. 77–84.
- 106 Meyer P., Rusch W. Production Coating Cost Comparison // *Proceedings of of the 2003 International Thermal Spray Conference*. – Florida: Orlando., 2003. – P. 123–128.
- 107 Vasudev H., Thakur L., Singh H., Bansal A. Effect of addition of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on the high-temperature solid particle erosion behaviour of HVOF sprayed Inconel-718 coatings // *Materials Today Communications*. – 2022. – Vol.30. – P. 103017.
- 108 Зверев А.И., Шаривкер С.Ю., Астахов Е.А. Детонационное напыление покрытий. – Ленинград: Судостроение, 1979. – 232 с.
- 109 Blinkov I. V., Belov D. S., Laptsev A. I., Anikeev A. S. and Ivanov V. V. Flame sprayed and plasma sprayed Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> coatings // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2021. – Vol.1954. – P. 1-4.
- 110 Пузряков А. Ф. Теоретические основы технологии плазменного напыления: учеб. пособие по курсу «Технология конструкций из металлокомпозитов» // – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана. - 2-е изд., перереб. и доп. – 2008. – 360 с.



111 Li H.Q., Guo H., Shen F.L., Lou D.J., Xia W.L., Fang X.Y. Tribological and corrosion performance of the plasma-sprayed conformal ceramic coating on selective laser melted CoCrMo alloy // *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. – 2021. – Vol.119. – P. 1-4.

112 Ariharan S., Kantesh Balani Fretting wear behaviour and frictional force mapping of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> based thermal barrier coatings // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2021. – Vol.98. – P. 1–10.

113 Giovanni Bolelli, Daniel Steduto, Jarkko Kiilakoski, Tommi Varis, Luca Lusvarghi, Petri Vuoristo Tribological properties of plasma sprayed Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub>, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> coatings // *Wear*. – 2018. – Vol.480-481. – P. 1–18.

114 Dongsheng Wang, Rui Xiao, Guang Qu, Xinhua Zhou, Influences of Laser Remelting on Hot Corrosion Resistance of Plasma-sprayed Nanostructured Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-13wt.%TiO<sub>2</sub> Coating // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2021. – Vol.1965. – P. 1–7.

115 Lifeng Xu, Dongsheng Wang. Grain growth characteristics of plasma-sprayed nanostructured Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-13wt.%TiO<sub>2</sub> coatings during laser remelting // *Ceramics International*. – 2021. – Vol.47. – P. 15052–15058.

116 Wang D.S., Tian Z.J., Shen L.D., Liu Z.D., Huang Y.H. Influences of laser remelting on microstructure of nanostructured Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-13wt.%TiO<sub>2</sub> coatings fabricated by plasma spraying // *Applied Surface Science*. – 2004. – Vol.255. – P. 4606–4610.

117 Hirata T., Ohta S., Morimoto T. Influence of impurities in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramics on hot corrosion resistance against molten salt // *Journal of the European Ceramic Society*. – 2003. – Vol.23. – P. 91–97.

118 ´Alvaro Cubero, Elena Martínez, Germ´an F. de la Fuente, Irene García Cano, Sergi Dosta, Luis A. Angurel Large enhancement of thermal conductance at ambient and cryogenic temperatures by laser remelting of plasma-sprayed Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coatings on Cu // *Materials Research Bulletin*. – 2021. – Vol.143. – P. 111450.

119 Rong Li, Yuchang Qing, Wei Li, Yang Li The electromagnetic absorbing properties of plasma-sprayed TiC/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coatings under oblique incident microwave irradiation // *Ceramics International*. – 2021. – P. 1-5.

120 Meihui Sun, Jinsong Song, Cuiwei Du, Yong Yang, Dianran Yan Fundamental understanding on the microstructure and corrosion resistance of Cr-(Cr, Al)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite coatings in-situ synthesized by reactive plasma spraying // *Surface & Coatings Technology*. – 2021. – Vol.423. – P. 127608.

121 Zhiping Pan, Jianzheng Guo, Shuangming Li, Xuguang Li, Hai Zhang Properties of alumina coatings prepared on silica-based ceramic substrate by plasma spraying and sol-gel dipping methods // *Ceramics International*. – 2021. – Vol.47. – P. 27453–27461.

122 Yang Z., Yin Z., Shi Y., Zhao Z., Fei X., Yu J., Ren Z., Yu G. Microstructure and bending strength improvement of alumina-based ceramic cores by liquid silicone resin infiltration // *Materials Chemistry and Physics*. – 2020. – Vol.239. – P. 122041.

123 Wu H.H., Li D.C., Tang Y.P., Chen X.J., Xu D.Y., Sun B. Improving high temperature properties of alumina based ceramic cores containing yttria by vacuum impregnating // *Materials Science and Technology*. – 2011. – Vol.27. – P. 823–828.

124 Kim K.S., Ko P.J., Cho M.Y., Lee Y.S., Sohn H., Park C., Shin W.H., Koo S.M., Lee D. W., Oh J.M. Fabrication of high-quality alumina coating through novel, dual-particle aerosol deposition // *Ceramics International*. – 2020. – Vol.46. – P. 23686 – 23694.

125 Jia-Feng Fan, Guo Liu, Xue-Shi Zhuo, Xiao-Feng Zhang, Jun-Li Feng, Wo Jiang, Yan-Qing Jiang, Ju-Hang Yin, Bing He, Yong-Jun Hu, Rong-Jiu Li, Shuang-Quan Guo, Huan-Tao Chen, Chun-Ming Deng, Min Liu, Ke-Song Zhou In-situ reaction synthesis  $\text{Al}_2\text{O}_3$  overlay modified 7YSZ TBC for NaCl hot corrosion // *Ceramics International*. – 2021. – Vol.272. – P. 1–12.

126 Xing-yu Wang, Wei Yang, Yu-xuan Shao, Yong Yang, Zhen-long Yang, Yan-wei Wang, Yu-hang Cui, Yu-duo Ma, Wen-wei Sun, Wei Li Effect of nano- $\text{Al}_2\text{O}_3$  on the microstructure and properties of  $\text{NbB}_2$  - $\text{NbC}$  composite coatings prepared by plasma spraying // *Journal of the American Ceramic Society*. – 2022. – Vol.105(1). – P. 712-727.

127 Zhang Q, Yang Y, Ren XX, Yang ZL, Gao PY, Zhao CC, et al. Microstructure and properties of composite coatings prepared by plasma spraying  $\text{ZrO}_2$ - $\text{B}_2\text{O}_3$  -Al composite powders // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2018. – Vol.740. – P. 124-131.

128 Wei Li, Lei Wang, Yong Yang, Xia Zhang, Yu-hang Cui, Yu-duo Ma, Yan-wei Wang, Wen-wei Sun, Xing-yu Wang, Yu-xuan Shao Microstructure and properties of niobium carbide composite coatings prepared by plasma spraying // *Ceramics International*. – 2021. – Vol.47(23). – P. 33338-33352.

129 Monika Michalak, Filofteia-Laura Toma, Leszek Latka, Pawel Sokolowski, Maria Barbosa and Andrzej Ambroziak. Study on the Microstructural Characterization and Phase Compositions of Thermally Sprayed  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{TiO}_2$  Coatings Obtained from Powders and Water-Based Suspensions // *Materials*. – 2020. – Vol.13. – P. 2638.

130 Cheng Gao, Yangsheng Jiang, Dayong Cai, Jinyong Xu and Weiyao Xiao. Effect of Temperature on the Microwave-Absorbing Properties of an  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{MoSi}_2$  Coating Mixed with Copper // *Coatings*. – 2021. – Vol.11. – P. 940.

131 Wen Deng, Lin Tang, Hui Qi, Changfu Zhang. Investigation on the Tribological Behaviors of As-Sprayed  $\text{Al}_2\text{O}_3$  Coatings Sealed with  $\text{MoS}_2$  Dry Film Lubricant // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2021. – Vol.30(6). – P. 1624-1637.

132 Owoseni T. A., Bai M., Curry N., Lester E. H., Grant D. M., Hussain T. Residual Stress Measurement of Suspension HVOF-Sprayed Alumina Coating via a Hole-Drilling Method // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2021. – Vol. 29(6). – P. 1339-1350.

133 Rukhande Sanjay W. & Rathod W. S. Tribological Behaviour of Plasma and HVOF-sprayed NiCrSiBFe Coatings // *Surface Engineering*. – 2020. – Vol. 36(7). – P. 745-755.

- 134 Wei Z., Wu Y., Yang W., Hong S., Qiao L., Cheng J. Effects of loads on high-temperature wear properties of HVOF sprayed CoCrAlYTa-10%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr coatings // *Materials Research Express*. – 2019. – Vol.6(10). – P. 106541.
- 135 Abu-warda N., López A.J., López M.D., Utrilla M.V. High temperature corrosion and wear behavior of HVOF-sprayed coating of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> -NiAl on AISI 304 stainless steel // *Surface & Coatings Technology*. – 2019. – Vol.359. – P. 35-46.
- 136 Ghadami F., Sabour Rouh Aghdam A., Zakeri A., Saeedi B., Tahvili P. Synergistic effect of CeO<sub>2</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticle dispersion on the oxidation behavior of MCrAlY coatings deposited by HVOF // *Ceramics International*. – 2020. – Vol.46(4). – P. 4556-4567.
- 137 Hitesh Vasudev, Lalit Thakur, Harmeet Singh, Amit Bansal. A study on processing and hot corrosion behaviour of HVOF sprayed Inconel718-nano Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coatings // *Materials Today Communications*. – 2020. – Vol.25. – P. 101626.
- 138 Hitesh Vasudev, Lalit Thakur, Harmeet Singh, Amit Bansal. An investigation on oxidation behaviour of high velocity oxy-fuel sprayed Inconel718-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite coatings // *Surface & Coatings Technology*. – 2020. – Vol.393. – P. 125770.
- 139 Meena S.L., Ankit Tyagi, Qasim Murtaza, Walia R.S., Niranjana M.S. Effect of load on the wear behaviour of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> HVOF sprayed coating // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2021. – Vol.1950. – P. 012011.
- 140 Тюрин Ю.Н. Совершенствование оборудования и технологий детонационного нанесения покрытий // *Автомат сварка*. – 1999. - Т.51, №5. - С. 13-18.
- 141 Патент Украины на винахід № 83831. Спосіб детонаційного напилення покриття і прилад для його здійснення / Ю.Н.Тюрин., О.В. Колисниченко Патент Украины на винахід № 83831, 26.08.2008.
- 142 Харламов Ю.А., Будагьянц Н.А. Детонационно-газовые процессы в промышленности. – Луганск: изд-во Восточно Укр. гос. ун-та., – 1998. – 223 с.
- 143 Fagoaga I., Barykin G., De Juan J., Soroa T., Vaquero C., Coatings A., Inasmet F. The high frequency pulse detonation spray process // *Thermal Spray*. –1999. – Vol. 27. – P. 282–287.
- 144 Dorfman M.R., Sharma A. Challenges and strategies for growth of thermal spray markets: the six-pillar plan // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2013. – Vol.22 (5). – P. 559–563.
- 145 Wellman R.G., Nicholls J.R. Erosion, corrosion and erosion-corrosion of EB-PVD thermal barrier coatings // *Tribology International*. – 2008. – Vol. 41. – P. 657–662.
- 146 Ульяницкий В.Ю., Ненашев М.В., Калашников В.В. и др. Опыт исследования и применения технологии нанесения детонационных покрытий // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. – 2010. –Т. 2, №1(2). – С. 569-575.
- 147 Бартенев С.С. Оптимизация процесса детонационного напиления // В кн.: *Жаростойкие покрытия* Л.: Наука. – 1979. – С. 89-92.
- 148 Бартенев С.С., Федько Ю.П., Григоров А.И. Детонационные покрытия в машиностроении. – Москва: Машиностроение, 1982. – 217 с.

- 149 Тюрин Ю.Н., Погребняк А.Д., Колисниченко О.В. Сравнительный анализ эффективности кумулятивнодетонационного и HVOF устройств для газотермического напыления покрытий // Физическая инженерия поверхности. – 2009. – Т. 7, № 1-2. – С. 39-45.
- 150 Nikolaev Y. A., Vasiliev A. A., Ulianitsky V. Yu. Gas detonation and its application in engineering and technologies // Combustion, Explosion, and Shock Waves. – 2003. – Vol.39. – P. 382–410.
- 151 Sharma S.K., Venkata Manoj Kumar B., Lim K.Y., Kim Y.W., Nath S.K. Erosion behavior of SiC-WC composites // Ceramics International. – 2014. – Vol. 40. – P. 6829 – 6839.
- 152 Kharlamov Y. A. Detonation spraying of protective coatings // Materials Science and Engineering. – 1987. – Vol. 93. – P. 1 – 37.
- 153 Astakhov E. A. Controlling the properties of detonation-sprayed coatings: major aspects // Powder Metall. Metal Ceram. – 2008. – Vol.47. – P. 70–79.
- 154 Singh L., Chawla V., Grewal J.S. A Review on detonation gun sprayed coatings // Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering. – 2012. – Vol.11. – P. 243–265.
- 155 Gavrilenko T.P., Nikolaev Yu. A., Ulianitsky V. Yu., Kim M. Ch., Hong J. W. Computational code for detonation spraying process // Proceedings of the 1st International Thermal Spray Conference. – France, 1998. – P.1475–1483.
- 156 Gavrilenko T., Nikolaev Yu. Calculation of detonation gas spraying // Combustion, Explosion, and Shock Waves. – 2007. – Vol. 43. – P.724–731.
- 157 Batraev I. S., Ulianitsky V. Yu., Dudina D. V. Detonation spraying of copper: theoretical analysis and experimental studies // Materials Today: Proceedings. – 2017. – Vol.4. – P. 24-29.
- 158 Smurov I., Pervushin I. D., Chivel Yu., Laget B., Ulianitsky V., Zlobin S. Measurements of particles parameters at detonation spraying // Proceedings Thermal Spraying Conference. – Singapore, 2010. – P.145–149.
- 159 Sampath S., Herman H. Rapid solidification and microstructure development during plasma spray deposition // Journal of Thermal Spray Technology. – 1996. – Vol. 5(4). – P. 445–456.
- 160 Schmidt T., Assadi H., Gärtner F., etc. From Particle Acceleration to Impact and Bonding in Cold Spraying // Journal of Thermal Spray Technology. – 2009. – Vol.18 (5-6). – P. 794–808.
- 161 Papyrin A.N. Cold Spray: State of the Art and Applications // Cold Spray Technology. – 2006. – Vol.9. – P. 1–21.
- 162 Погребняк А.Д., Братушка С.Н., Углов В.В. и др. Структура и свойства покрытия из Ni-Cr-B-Si-Fe/WCCo, нанесенного на подложку из стали и меди // Физическая инженерия поверхности. – 2008. – Т. 6, № 1-2. – С. 92-97.
- 163 Тюрин Ю.Н., Колисниченко О.В., Цыганков Н.Г. Импульсно-плазменное упрочнение инструмента // Автоматическая сварка. – 2001. – Т. 78, №1. – С. 38-44.
- 164 Тюрин Ю.Н., Жадкевич М.Л., Погребняк А.Д., Колисниченко О.В. Импульсно-плазменное оборудование и технологии для модифицирования и нанесения покрытий на рабочие поверхности инструмента и деталей машин //

Труды VI-й Международной конференции «Пленки и покрытия 2001». – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет. 2001. – С. 71-81.

165 Погребняк А.Д., Тюрин Ю.Н. Модификация свойств материалов и осаждение покрытий с помощью плазменных струй // Успехи физических наук. – 2005. – Т. 175, № 5. – С. 515-545.

166 Ревун С.А. Митько М.М., Балакирев В.Ф. Моделирование процессов нагрева и движения частиц при плазменном напылении покрытий // Физика и химия обработки материалов. – 2000. – Т. 89, № 1. – С. 52-57.

167 Харламов Ю.А. Напряженность поверхности детали при соударении с расплавленной частицей // Физика и химия обработки материалов. – 1988. – Т.11, № 6. – С. 80-85.

168 Беликова А.Ф., Булаев А.М., Буракова С.М. и др. Динамика формирования детонационных покрытий // Физика и химия обработки материалов. – 1989. – Т.4, № 4. – С. 100-106.

169 Борисов Ю.С., Борисова А.Л. Плазменные порошковые покрытия // – Киев: Техника, 1986. – 223 с.

170 Кикоина И.К. Таблицы физических величин / Под ред. акад. И.К. Кикоина, – Москва: Атомиздат, 1976. – 1008 с.

171 Costil S., Verdy C., Bolot R., Coddet C. On the Role of Spraying Process on Microstructural, Mechanical and Thermal Response of Alumina Coatings // Thermal Spray, Global Coating Solutions, ASM International, Materials Park, Ohio, USA. – 2007. – Vol.16, № 5. – С. 533-537.

172 Семенов А.П., Ковш И.Б., Петрова И.М. и др. Методы и средства упрочнения деталей машин. – Москва: Наука, 1992. – 404 с.

173 Погребняк А.Д., Кульментьева О.П., Кшнякин В.С. и др. Микроструктура и свойства нержавеющей стали 316L и сплава на основе Ni, нанесенных в виде покрытий на сталь SS-400 // Труды VI-й Международной конференции «Пленки и покрытия 2001». – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет. 2001. – С. 56-61.

174 Иванов Е.М., Углов А.А. Теплофизические процессы при плазменном напылении тугоплавких металлов // Физика и химия обработки материалов. – 1985. – №2. – С. 61-64.

175 Кравченко Ю.А. Расчет контактной температуры в процессе плазменно-детонационного напыления порошковых покрытий // Матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів факультету технічних систем та енергоефективних технологій: конференція присвячена Дню науки в Україні. – Суми: СумДУ, 2009. – Ч.ІІ. – С. 70-71.

176 Колисниченко О.В. Формирование модифицированных слоев при плазменно-детонационной обработке углеродистых сталей: автореф. диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук, специальность ВАК: 05.03.06 Технологии и машины сварочного производства / Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины. – Киев, 2003. – 20 с.

177 Кудинов В.В. Пекшев П.Ю., Белашенко В.Е. и др. Нанесение покрытий плазмой. – Москва: Наука, 1990. – 408 с.

178 Мусин Р.А., Уточкин В.В. Взаимодействие напыленного оксида алюминия с коррозионно-стойкими сталями // Сварочное производство. – 1994. – №6. – С. 15-16.

179 Pogrebnjak A.D., Il'jashenko M.V., Kul'ment'eva O.P. et al. Structure and properties of  $Al_2O_3 + Cr_2O_3$  coatings deposited to steel 3 (0,3 wt.% C) substrate using pulsed detonation technology // Vacuum. – 2001. – V.62. – P. 21-26.

180 Погребняк А. Д., Кравченко Ю.А. Формирование гибридных покрытий  $TiN/Cr/Al_2O_3$  и  $TiN/Al_2O_3$  на подложках из AISI 321 // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2006. – №11. – С. 74-96.

181 Погребняк А.Д., Кравченко Ю.А., Горлачев И.Д., Рузимов Ш.М., Ноли Ф., Хадзидимиру А. Особенности структуры и свойств гибридных покрытий  $TiN/Cr/Al_2O_3$  и  $TiN/Al_2O_3$ , полученных в результате комбинированной обработки // Металлофизика и новейшие технологии. – 2006. – Т. 28, № 7. – С. 1001–1023.

182 Ahmad I., Kennedy A., Zhu Y.Q. Wear resistant properties of multi-walled carbon nanotubes reinforced  $Al_2O_3$  nanocomposites // Wear. – 2010. – Vol. 269. – P. 71–78.

183 Гавриленко Т.П., Николаев Ю.А., Прохоров Е.С. О механизмах образования покрытий при газотермическом напылении // Физика горения и взрыва. – 1990. – Т. 26, № 3. – С. 110–122.

184 Gao Y., Kang Y., Kang An, Dalian Ch. Compound coatings of  $MCrAlY$  and alumina prepared by detonation thermal spraying // Thermal Spray connects. – 2005. – Vol.32-33, № 11. – P.1403-1405.

185 Turunen E., Varis T., Keskinen J., Fält T., Hannula S. Improved Mechanical Properties by Nanoreinforced HVOF Sprayed Ceramic Composite Coatings // Proceedings of the 2006 International Thermal Spray Conference. –Washington: Seattle, 2006. – P. 1240-1245.

186 Heiman R.B. Applications of Plasma-Sprayed Ceramic Coatings // Key Engineering Materials. – 1996. – Vol.122-124. – P. 399-442.

187 McPherson R. The Relationship between the Mechanism of Formation, Microstructure and Properties of Plasma Sprayed Coatings // Thin Solid Films. – 1981. – Vol. 83 (3). – P. 297-310.

188 Соколов Т.В., Козлова И.П., Дерко Л.С. Исследование параметров пористой структуры и фазового состава плазменных покрытий на основе высокотемпературных окислов // Высокотемпературная защита металлов. – Ленинград: Наука, – 1981. – С. 172-177.

189 Шмаков А.М. Формирование газотермических покрытий на порошковых материалах // Физика и химия обработки материалов. – 1986. – №4. – С. 51-57.

190 Матвеев Ю.И. Повышение долговечности деталей судовых дизелей с использованием плазменного напыления и лазерной обработки: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук, специальность ВАК:

05.08.04 - Технология судостроения, судоремонта и организация судостроительного производства / – Новгород. 2003. – 301 с.

191 Stahr C.C., Saaro S., Berger L.-M., Dubsy J., etc. Dependence of the Stabilization of  $\alpha$ -Alumina on the Spray Process // Thermal Spray Technology. – 2007. – Vol.16 (5-6). – P. 822-830.

192 Бодяко М.Н., Вурзель Ф.Н., Куприянов И.Л. и др. Газотермическая обработка керамических оксидов / Под ред. О.В. Романа. – Минск: Наука и техника, 1988. – 223 с.

193 Chang-Jiu Li, Sun Bo. Microstructure and property of  $Al_2O_3$  coating microplasma-sprayed using a novel hollow cathode torch // Materials Letters. – 2003. – Vol.58. – P. 179–183.

194 Ульшин В.А., Харламов М.Ю. Оптимизация параметров детонационно-газового напыления с использованием генетического алгоритма // Автоматическая сварка. – 2005. – №2. – С. 32-37.

195 Ханамирова А.А., Оганесян П.Л., Адимосян А. Р., Апресян Л. П. Ханамирова А.А. Получение из технического гидроксида алюминия малощелочного, высокодисперсного корунда для тонкого полирования // Журнал Прикладной Химии. – 1998. – Т.71, № 10. – С. 1600–1603.

196 Борисова А.Л., Адеева Л.И., Сладкова В.Н. Фазовые превращения в газотермических покрытиях из оксида алюминия // Автоматическая сварка. – 1997. – №9. – С. 26-32.

197 Калинина, А. М. О связи между структурой и характером термических превращений различных соединений окиси алюминия // Химия и технология глинозёма: Труды IV Всесоюз. совещ. – Новосибирск: Наука, 1971. – С. 360–369.

198 Пат. 1802522 Российская Федерация. Керамический композиционный материал и способ его получения / Баринов С. М, Беляков А. В, Власов А. С, Иванов Д. А, Кондратьева О. И, Лукин Е. С, Фомина Г. А; заявитель Московский химико-технологический институт им. Д. И. Менделеева. опубл. 20.07.2006, Бюл. № 20. – 1 с.

199 United States Patent 5482673. Method for preparing ceramic Composite / Kathleen B. Alexander, Oak Ridge; Terry N. Tieg, Lenoir City; Paul F. Becher, Oak Ridge; Shirley B. Waters, Knoxville, all of Tenn. Date of Patent: Jan. 9, 1996, Appl. №.250,266.

200 United States Patent 5129801. Fabrication Of High Temperature Mater Als By / Barry H. Rabin, Gary E, Richard N. Richard L. Williamson. Date of Patent: Jul. 14, 1992. Appl. №.641,945

201 Пат. 2379257 Российская Федерация, МПК С 04 В 35/10. Способ изготовления изделий из корундовой керамики / Саванина Н. Н., Русин М. Ю., Горчакова Л. И., Саломатина Л. И. № 2008141080/03; заявл. 17.10.08; опубл. 20.01.10, Бюл. № 2.

202 Xinying Tenga, Hanlian Liu, Chuanzhen Huang. Effect of  $Al_2O_3$  Particle Size on the Mechanical Properties of Alumina-based Ceramics // Materials Science and Engineering A. – 2007. – Vol.452-453. – P. 545-551.

203 Patent 7723249 US. Ceramic Material for High-Temperature Service / Doesburg Jacobus C., Xie Liangde, Dorfman Mitchell. publi. 25.05.2010.

204 Анциферов В.Н., Порозова С.Е., Кульметьева В.Б., Крохалева Е.Г. Керамический материал на основе нанокристаллического порошка  $ZrO_2$ , стабилизированного концентратом РЗЭ // Огнеупоры и техническая керамика. – 2011. – Т.3. – С. 3-9.

205 Патент 2249570 Российская Федерация. Состав шихты для изготовления керамического материала зернистого строения из диоксида циркония / Лукин Е.С., Власов А.С., Минеев В.Н., Макаров Н.А., Акопов Ф.А., Чернышев Г.П. опубли. 10.04.2005 Бюл. № 10. – 3 с.

206 Патент 2341494 Российская Федерация. Композиционный керамический материал / Мельников А. Г., Кульков С. Н., Савченко Н. Л., Саблина Т. Ю.; заявитель и патентообладатель Институт физики прочности и материаловедения Сибирское отделение Российской академии наук. – № 2007104479/03; заявл. 05.02.2007; опубли. 20.12.2008. Бюл. № 35. – 3 с.

207 Heyi Ge, Jianye Liu, Xianqin Hou. Effects of  $ZrO_2$  Fibers on the Mechanical Properties of Nano  $ZrO_2/Al_2O_3$  Ceramic Composites // Advanced Materials Research. – 2012. – Vol. 455–456. – P.645-649.

208 Wang F., Kai Feng Zhang, Wen Bo Han. Superplastic Extrusion of Ultra Fine-grained  $3Y-ZrO_2/Al_2O_3$  Ceramic for Turbine Disk Materials // Science Forum. – 2007. – Vol. 551–552. – P.501-506.

209 Лукин Е.С. Получение наноструктурированных порошков частично стабилизированного диоксида циркония для керамики с высокой механической прочностью // Стекло и керамика. – 2010. – Т. 4. – С. 18-21.

210 Asadi S., Abdizadeh H., Vahidshad Y. Effect of Crystalline Size on the Structure of Copper Doped Zirconia Nanoparticles Synthesized via Sol-Gel // Journal of Nanostructures. – 2012. – Vol.2. – P.205–212.

211 Chang-Ju Ho, Wei-Hsing Tuan. Phase stability and Microstructure Evolution of Ytria- stabilized Zirconia during Firing in a Reducing Atmosphere // Ceramics International. – 2011. – Vol. 37. – P.1401-1407.

212 Патент 9514492 Корея. Материал оксид алюминия – муллит – оксид циркония и его получение / опубли. 02.12.1995.

213 Patent 4687652 USA. Low temperature formation of mullite using silicon alkoxide and aluminum alkoxide / Yoldas Bulent E., Partlow Deborah P.; – № 86772786; Application Priority Data 28.05.1986, publi. 18.08.1987.

214 Патент 2292320 Российская Федерация. Способ получения порошка керамического композиционного материала / Каблов Е. Н., Щетанов Б. В., Ивахненко Ю. А., Максимов В. Г., Щеглова Т. М., Охотникова Ю. А.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов. – № 2005125772/03; заявл. 15.08.2005; опубли. 27.01.2007. Бюл. № 3. – 3 с.

215 Patent 4421861 USA. High-strength and temperature-change resistant ceramic formed body, especially of mullite, its production and use / Claussen Nils, Petzow Gunter, Brook Richard J. – № 2920795; Application Priority Data 22.05.1979, publi. 20.12.1983.



216 Fauchais P., Montavon G., Bertrand G. From powders to thermally sprayed coatings // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2010, – Vol.19, – P. 56-80.

217 Peat T., Gallowaya A., Toumpis A., McNutt P., Iqbal N. The erosion performance of cold spray deposited metal matrix composite coatings with subsequent friction stir processing // *Applied Surface Science*. – 2017. – Vol.396. – P. 1635–1648.

218 Dongmo E., Wenzelburger M., Gadow R. Analysis and optimization of the HVOF process by combined experimental and numerical approaches // *Surface and Coatings Technology*. – 2008. – Vol.202. – P. 4470-4478.

219 Dudek A., Iwaszko J. Structural and phase investigations of oxide coatings of  $\text{TiO}_2$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3 + 13\text{wt.}\% \text{TiO}_2$  after remelting // *Archives of Materials Science and Engineering*. – 2008. – Vol.33. – P. 39–44.

220 Senderowski C., Chodala M., Bojar Z. Corrosion behavior of detonation gun sprayed Fe-Al type intermetallic coating // *Materials*. – 2015, – Vol.8, – P. 1108-1123.

221 Senderowski C. Nanocomposite Fe-Al intermetallic coating obtained by gas detonation spraying of milled self-decomposing powder // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2014. – Vol.23. – P. 1124-1134.

222 Ulianitsky V., Shtertser A., Zlobin S. et al. Computer controlled detonation spraying: from process fundamentals toward advanced // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2011, – Vol.20. – P. 791-801.

223 Isakov M., Matikainen V., Koivuluoto H., May M. Systematic analysis of coating-substrate interactions in the presence of flow localization // *Surface and Coatings Technology*. – 2017. – Vol.324, – P. 264-280.

224 Patent 2005/079370 USA. Multilayer nanostructures, parts and methods for their preparation / Kinzer Daniel M, Beach Robert. – № 11/056,062; Application Priority Data 11.02.2005, publi. 14.04.2005.

225 Krishnamurthy R., Rankin J., Sheldon B.W. Effect of Oxidation on Crack Deflection in  $\text{SiC}/\text{Al}_2\text{O}_3$  Laminated Ceramic Composites // *Journal of the American Ceramic Society*. – 2005. – Vol.88, № 5. – P.1362-1365.

226 Saladi S., Menghani J., Prakash S. Effect of  $\text{CeO}_2$  on cyclic hot-corrosion behavior of detonation-gun sprayed  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ -NiCr coatings on Ni-based superalloy // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2015. – Vol. 24. – P. 1379-1389.

227 Patent 5601674 USA. Fiber reinforced ceramic matrix composite member and method for making / Szweda A., Millard M. L., Harrison M. G. – № 12900293; Application Priority Data 28.09.1993, publi. 11.02.1997.

228 Gavrilenko T. P., Nikolaev Yu. A., Prokhorov E. S., Ul'yanitskii V. Yu. Mechanisms of coating formation with flame spraying // *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. – 1990. – Vol.26. – P. 228–238.

229 Штерцер А. А., Ульяницкий В. Ю., Батраев И. С., Сапрыкин Ф. И., Громилов С. А., Окотруб А. В. Получение ультрадисперсного углерода детонационным способом // Труды V Всероссийской конференции “Взаимодействие высококонцентрированных потоков энергии с материалами в перспективных технологиях и медицине”. 2013. – С. 283-286.

230 Shtertser A. A., Ulianitsky V. Yu., Batraev I. S., Gromilov S. A., Okotrub A. V., Saprykin A. I. Diagnostics of the structure and composition of ultrafine carbon obtained by detonation // *Journal of Structural Chemistry*. – 2014. – Vol.55. – P. 986-989.

231 Laha T., Agarwal A., McKechnie T. Forming nanostructured hypereutectic aluminum via high-velocity oxyfuel spray deposition // *JOM*. – 2004. – Vol.56 – P. 54-56.

232 Fauchais P., Montavon G., Lima R. S., Marple B. R. Engineering a new class of thermal spray nano-based microstructures from agglomerated nanostructure particles, suspensions and solutions: an invited review // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2011. – Vol.44. – P. 53.

233 Manojkumar P. A., Gandhi A. S., Kamaraj M., Thomas Paul V., Kumar N., Tyagi A. K. Role of nanocrystalline feedstock in the tribological behaviour of alumina coatings deposited by detonation gun // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2012. – Vol. 35. – P.108-114.

234 Deevi S. C., Sikka V. K., Swindeman C. J., Seals R. D. Application of reaction synthesis principles to thermal spray coatings // *Journal of Materials Science*. – 1997. – Vol. 32. – P. 3315-3325.

235 Yao Y., Wang Z., Zhou Z., Jiang S., Shao J. Study on reactive atmospheric plasma-sprayed in situ titanium compound composite coating // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2013. – Vol. 22. – P. 509-517.

236 Tsunekawa Y., Okumiya M., Kobayashi T., Okuda M., Fukumoto M. Chromium nitride in situ composites with a compositional gradient formed by reactive DC plasma spraying // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 1996. – Vol. 5. – P. 139-144.

237 Вурзель Ф.Б., Хмельник В.А., Назаров В.Ф. и др. О получении газотермических корундовых покрытий // *Физика и химия обработки материалов*. – 1988. – № 3. – С. 86-91.

238 Ильяшенко М.В. Структура и свойства керамических покрытий, нанесенных высокоскоростной импульсной струей плазмы на металлические подложки: диссертация кандидата физикоматематических наук, специальность ВАК: 01.04.07 – физика конденсированного состояния. – Сумы, 2003. – 159 с.

239 Патент 2400310 Российская Федерация. Импульсный дозатор порошка / В.Ю. Ульяницкий, А.Л. Кирякин, А.А. Штерцер, С.Б. Злобин; опубл. 27.09.2010, Бюл. №27. – 4 с.

240 Хейкер Д.М., Зевин А.С. Рентгеновская дифрактометрия. – М.: Физматгиз, 1963. – 540 с.

241 Троян В.И., Пушкин М.А., Борман В.Д., Тронин В.Н. Физические основы методов исследования наноструктур и поверхности твердого тела. – М.: МИФИ, 2008. – 260 с.

242 Углов В.В., Черета Н.Н., Анищик В.М. Методы анализа элементного состава поверхностных слоев: учебное пособие. – Минск: Белорусский гос. Университет, 2007. – 164 с.

243 Гоулдстейн Дж., Ньюбери Д., Эчлин П., и др. Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ / под. ред. И.В. Петрова. – М.: Мир, 1984. – Т. 2. – 348 с.

244 Боярская Ю.С., Грабко Д.З., Кац М.С. Физика процессов микроидентирования. – Кишинев: Штииница, 1986. – 295 с.

245 Гладких А.И., Малыхин С.В., Пугачев А.Т. Дифракционные методы анализа внутренних напряжений. Теория и эксперимент: учебное пособие. – Харьков: НТУ “ХПИ”, 2006. – 304 с.

246 Постановлением Государственного комитета СССР. ГОСТ 23.208-79 Метод испытания материалов на износостойкость при трении о нежестко закрепленные абразивные частицы: 29 ноября 1979 г. № 4578 // утв. 01.03.1981.

247 Oliver W.C., Pharr G.M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments // Journal of Materials Research. – 1992. – Vol. 7. – P. 1564-1583.

248 Saravanan M., Devaraju A., Venkateshwaran N., Krishnakumari A., Saarvesh J. A review on recent progress in coatings on AISI austenitic stainless steel // Materialstoday proceeding. – 2018. – Vol. 5(6). P. 14392-14396.

249 Sudhansu Ranjan Das, Asutosh Panda, Debabrata Dhupal. Hard turning of AISI 4340 steel using coated carbide insert: Surface roughness, tool wear, chip morphology and cost estimation // Materialstoday proceeding. – 2018. – Vol. 5. P. 6560-6569.

250 Randall N. Overview of mechanical testing standards // CSM Instruments Applications Bulletin. – 2002. – №18. – P. 3.

251 Rakesh G., Singh S. B., Grewal J. S. Surface Engineering and Detonation Gun Spray Coating // International Journal of Engineering Studies. – 2010. – Vol. 2 (N3). – P. 351-357.

252 Ravi Shankar A., Thyagrajan K., Upadhyay C., Mallika C., Kamachi Mudali U. Plasma-sprayed alumina coating on Inconel 600 for fast reactor neutron detector application // Surface Engineering. – 2018. – Vol. 34. – P. 721-727.

253 Кантай Н., Рахадиллов Б.К., Пашковский М., Туякбаев Б., Заманғалиев Қ.С. Детонационный метод нанесения покрытий // Вестник Семипалатинского государственного университета им. Шакарима. – 2019. – №4(88). – С.44-46.

254 Sundarajan G., Sen D., Sivakumar G. The tribological behaviour of detonation sprayed coatings: the importance of coating process parameters // Wear. – 2005. – Vol. 258. – P. 377-391.

255 Chawla Vikas, Sidhu Buta Singh, Puri D. and Prakash S.; “performance of plasma sprayed Nanostructured and Conventional Coatings” // Journal of the Australian Ceramic Society. – 2008. – Vol. 44 (N2). – P. 56-62.

256 Thirumalaikumarasamy D., Shanmugam K., Balasubramanian V. Corrosion performance of atmospheric plasma sprayed alumina coatings on AZ31B magnesium alloy under immersion environment // Journal of the Ceramic Society. – 2014. – Vol. 2. – P. 403-415.

257 Dhakar B., Chatterjee S., Sabiruddin K. Influence of process parameters on the formation of phases and mechanical properties of plasma sprayed  $Al_2O_3$ - $Cr_2O_3$  coatings // Materials Research Innovations. – 2017. – Vol. 21. – P. 367-376.

258 Rajasekaran B., Sundara Raman Ganesh S., Joshi S.V., Sundararajan G. Influence of detonation gun sprayed alumina coating on AA6063 samples under cyclic loading with and without fretting // *Tribology International*. – 2008. – Vol. 41. – P.315–322.

259 Gallyamov A.A., Nenashev M.V., Ibatullin I.D., Murzin A.Y. Application detonation coatings to design a new metal cutting tool // *Transactions of the institute of metal finishing*. – 2018. – Vol. 96. – P. 290–294.

260 Batista C., Portinha A., Ribeiro R.M., Teixeira V., Costa M.F., Oliveira C.R. Morphological and microstructural characterization of laser-glazed plasma-sprayed thermal barrier coatings // *Surface and Coatings Technology*. – 2006. – Vol. 200. – P. 2929 – 2937.

261 Dudina D.V., Batraev I.S., Ulianitsky V.Y., Bulina N.V., Korchagin M.A., Lomovsky O.I. Detonation spraying of Ti-Al Intermetallics: phase and microstructure developments of the coatings // *Materials and Manufacturing Processes*. – 2015. – Vol. 30. – P. 724–729.

262 Saravanan P., Selvarajan V., Rao D.S., Joshi S.V., Sundararajan G. Influence of process variables on the quality of detonation gun sprayed alumina coatings // *Surface and Coatings Technology*. – 2000. – Vol.123. – P. 44–54.

263 Lima R.S., Marple B.R. Superior performance of high-velocity oxyfuel-sprayed nanostructured  $\text{TiO}_2$  in comparison to air-plasma sprayed conventional  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-13TiO}_2$  // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2005. – Vol.14. – P.397–404.

264 Dhakar B., Chatterjee S., Sabiruddin K. Effect of  $\text{H}_2$  flow rate and stand-off distance on the formation of phases in plasma-sprayed  $\text{Al}_2\text{O}_3$  coatings // *Transactions of the institute of metal finishing*. – 2017. – Vol. 95. – P. 321–327.

265 Vishal Sh., Sabiruddin K. An investigation on D-gun sprayed  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC}$  coatings // *Surface and Coatings Technology*. – 2019. – Vol. 375. – P. 303-314.

266 Kiilakoski J., Puranen J., Heinonen E., Koivuluoto H. & Vuoristo P. Characterization of Powder-Precursor HVOF-Sprayed  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-YSZ/ZrO}_2$  Coatings // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2019. – Vol. 28. – P. 98–107.

267 Rakhadilov B., Kantay N., Sagdoldina Z., Erbolatuly D., Bektasova G. and Paszkowski M. Experimental investigations of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  - and  $\text{ZrO}_2$  - based coatings deposited by detonation spraying // *Materials Research Express*. – 2021. – Vol.8. – P.1-13.

268 Kantai N., Rakhadilov B.K., Plotnikov S. V., Pashkovsky M., Abilev M. Heat-resistant coating based on aluminium and zirconium oxides // 18th IUPAC International symposium on macromolecular-metal complexes. – Moscow, 2019. – C.47.

269 Кантай Н., Рахадиллов Б.К., Какимжанов Д.Н. Получение покрытия на основе оксида циркония детонационным методом // VI Международная конференция «Лазерные, Плазменные исследования и технологии - ЛАПЛАЗ-2020». – Москва, 2020. – С.206-207.

270 Рахадиллов Б.К., Кантай Н. Изучение структуры и свойств детонационных покрытий на основе оксида алюминия и циркония // 14-й

Международной научно-технической конференции. – Беларусь, 2020. – С.529-532.

271 Кантай Н., Рахадиллов Б., Нәбиолдина А. Исследование влияния детонационного распыления на структурно-фазовое изменение оксида алюминия // Материалы VII Международной научно-технической конференции студентов, магистрантов и молодых ученых. – Усть-Каменогорск, 2021. – Часть II. – С.73-76.

272 Kantay N., Rakhadilov B., Plotnikov S.V., Pashkovsky M., Abilev M. Thermal Resistant Coating Obtained from Zirconium and Aluminum oxides by Detonation Method // NNC RK Bulletin. – 2019. – Vol. 4. – P. 103-107.

273 Kantay N., Rakhadilov B.K., Nabioldina A. Investigation of the adhesion strength and corrosion resistance of the coating based on aluminum oxide and zirconium obtained by the detonation method // Bulletin of D. Serikbayev East Kazakhstan technical university. – 2021. Vol. 1(91). – P.45-54.

274 Kantay N., Rakhadilov B.K., Paszkowski M., Tuyakbayev B., Kurbanbekov Sh., Nabioldina A. Research of annealing influence on the hardness of detonation coatings from aluminum oxide // Серия «Физика». Вестник Карагандинского университета. – 2021. – Vol. 2(102). – P. 6-13.

275 Rakhadilov B.K., Kakimzhanov D.N., Botabaeva G., Buitkenov D.B., Kantai N., Bayatanova L.B. Changes in the structure and properties of ZrO<sub>2</sub> detonation coatings during annealing // Eurasian Journal of Physics and Functional Materials. – 2020. – Vol. 4(4). – P. 319-326.

276 Rakhadilov B.K., Kakimzhanov D.N., Kantai N., Kowalewski P., Kozhanova R.S. Research of annealing influence on the hardness of detonation coatings from zirconium dioxide // Серия «Физика». Вестник Карагандинского университета. – 2020. – Vol. 2(98). – P. 75–82.

277 Jia-Ping Zhang, Qian-Gang Fu, Peng-Fei Zhang, Jun-Ling Qu, Rui-Mei Yuan, He-Jun Li Rapid heat treatment to improve the thermal shock resistance of ZrO<sub>2</sub> coating for SiC coated carbon/carbon composites // Surface & Coatings Technology. – 2016. – Vol. 285. – P. 24–30.

278 Акимов Г.Я., Тимченко В.М., Маринин Г.А. Влияние модификации тетрагональной фазы поверхностных слоев керамики на основе диоксида циркония на ее прочность // Физика твердого тела. – 2005. – Т. 47, № 11. – С. 1978–1980.

279 Maууа P., Marina K., Marii A., Maxim Y., Vseslav N., Vyacheslav S., Yurii T., Oleg K., Nikolay V. Effect of heat treatment of the alumina powder on the microstructure and properties of coatings // MATEC Web of Conferences. – Singapore, 2015. – P. 1-4.

280 Wijewardane S. Future Development of Thermal Spray Coatings // Thermal spray coatings in renewable energy applications. – 2015. – P. 241–257.

281 Қантай Н., Рахадиллов Б., Нәбиолдина А.Б., Ескермесов Д., Плотников С. В., Насырова А. Детонациялық әдіспен алюминий оксиді негізіндегі жылудан қорғағыш жабын алу // Студенттердің, магистранттардың және жас ғалымдардың VI Халықаралық ғылыми-техникалық конференция. – Өскемен, ШҚТУ, 2020. – IV бөлім. – Б.138-141.

282 Sagdoldina Zh.B., Rakhadilov B.K., Stepanova O.A., Maulit A. Structural evolution of ceramic coatings produced by mechanical alloying technique // Eurasian Journal of Physics and Functional Materials. – 2018. – Vol. 2(3). – P.242-250.

283 Sivkov A., Shanenkova Y., Saigash A., & Shanenkova I. High-speed thermal plasma deposition of copper coating on aluminum surface with strong substrate adhesion and low transient resistivity // Surface and Coatings Technology. – 2016. – Vol. 292. – P.63-71.

284 Jayaraj J., Sordelet D.J., Kim D.H., Kim Y.C., & Fleury E. Corrosion behaviour of Ni-Zr-Ti-Si-Sn amorphous plasma spray coating // Corrosion Science. – 2006. – Vol.48. – P. 950–964.

285 Alontseva D. L., & Prokhorenkova N.V. Modifikaciya oblucheniem strukturno-fazovogo sostoyaniya i svoystv poroshkovykh pokrytiy, nanesennykh plazmennoy stuey na stal'nye podlozhki // Bulletin of the University of Karaganda. Physics. – 2013. – Vol.71. – P.4-11.

286 Shaopeng Niu, Kesong Zhou, Liping Xu, Changguang Deng, Min Liu, & Jie Mao. A comparative study of  $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{Co}_{0.2}\text{Fe}_{0.8}\text{O}_3 - \delta$  oxygen transport membranes deposited on porous metal supports prepared by supersonic air-gas plasma spraying and low-pressure plasma spraying-physical vapor deposition // Surface and Coatings Technology. – 2016. – Vol. 307(A). – P.963-970.

287 Chang-Jiu Li, Akira Ohmori The lamellar structure of a detonation gun sprayed  $\text{Al}_2\text{O}_3$  coating // Surface and Coatings Technology. – 1996. – Vol. 82(3). – P.254-258.

288 Xuan Y., Wu Y.Q., Lin H.C., Shen T., Peide D. Ye. Submicrometer Inversion-Type Enhancement-Mode InGaAs MOSFET With Atomic-Layer-Deposited  $\text{Al}_2\text{O}_3$  as Gate Dielectric // IEEE Electron device letters. – 2007. – Vol. 28. – P. 935.

289 Cheng C.-W., Fitzgerald E.A. Improved interfacial state density in  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{GaAs}$  interfaces using metal-organic chemical vapor deposition // Applied Physics Letters. – 2010. – Vol.96, №20. – P. 202101.

290 Kantay N., Rakhadilov B., Kurbanbekov Sh., Yeskermessov D., Yerbolatova G. and Apezhanova A. Influence of Detonation-Spraying Parameters on the Phase Composition and Tribological Properties of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  Coatings // Coatings. – 2021. – Vol.11. – P. 793.

291 Патент пайдалы модель 6665 Қазақстан Республикасы, ХПЖ С23С 4/12. Детонациялық жабын жағу тәсілі / Қантай Н., Рахадиллов Б. К. өтінім беруші және патент иегері «С.Аманжолов атындағы ШҚУ» КЕАҚ. – №2021/0659.2 өтініш 30.06.2021; басылымға шығарылды 12.11.2021, – 3 б.

292 Ulianitsky V.Y., Batraev I.S., Shtertser A.A., Dudina D.V., Bulina N.V., & Smurov I. Detonation spraying behaviour of refractory metals: Case studies for Mo and Ta-based powders // Advanced powder Technolog. – 2018. – Vol.29. – P. 1859-1864.

293 Rupp S., Larsson A., Flink A. Nanoindentation hardness, texture and microstructure of  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  and  $\kappa\text{-Al}_2\text{O}_3$  coatings // Thin Solid Films. – 2008. – Vol. 516 (18). – P. 5959-5966.

294 Rakhadilov B., Maulet M., Abilev M., Sagdoldina Z., Kozhanova R. Structure and tribological properties of Ni–Cr–Al-based gradient coating prepared by detonation spraying // Coatings. – 2021. – Vol.2. P. 1–14.

295 Tian H.L., Guo M.Q., Wang C.L., Tang Z.H., Cui Y.J. Tribological behaviour of a self-lubricated GO/WC-12Co thermal spray coating // *Surface Engineering*. – 2018. – Vol.34. – P. 762–770.

296 Smurov I., Ulianitsky V. Computer controlled detonation spraying: a spraying process upgraded to advanced applications // *Surface Effects and Contact Mechanics*. – 2011. – Vol.71. – P. 265-276

297 Russia. GOST 4986–79 Cold-rolled Band from Corrosion-resistant and Heat-resistant Steel; USSR State Committee for Standards // Moscow. – 1979.

298 Ulianitsky V.Y. Physical foundations of detonation spraying: doctoral dissertation: 01.02.05 / Institute of Hydrodynamics M. A. Lavrentieva Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. – Novosibirsk, Russia, 2001. – P. 256.

299 Russia. GOST 9450–76 Measurements Microhardness by Diamond Instruments Indentation; Russian GOST // Moscow. – 1976.

300 Kantay N., Rahadilov B., Sagdoldina Z., Nabioldina A. Obtaining a protective coating on the surface of steel by the detonation method based on aluminum oxide // *Advanced materials manufacturing and research: new technologies and techniques (AMM&R-2021 online): Book of Abstracts of International Conference – Ust-Kamenogorsk: Publishing House of D. Serikbayev EKTU*. – 2021. – P. 44.

301 The United States of America. ASTM G133–95, Standard Test Method for Linearly Reciprocating Ball-on-Flat Sliding Wear // ASTM International: West Conshohocken, PA. – 1995.

302 The United States of America. ASTM G99–05, Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus // ASTM International: West Conshohocken, PA. – 2005.

303 Shoja S., Alm O., Norgren S., Andrén H.O., Halvarsson M. Calculated and experimental Schmid factors for chip flow deformation of textured CVD  $\alpha$ -alumina coatings // *Surface and Coatings Technology*. – 2021. – Vol.412. – P. 126991.

304 Algatti M.A., Santos C.N., Mota R.P., De Campos E., Lucena E.F., Machida M., Melo F.C.L. Characterization of SiC and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramics exposed to nitrogen ions from inverse-Z pinch plasma discharge // *16th Latin American Workshop on Plasma Physics*. – Canada, 2017. – P. 5-11.

305 Kaya G., Gunhan B., Ozer I.O., Poyraz H.B. Production of TiO<sub>2</sub> coated  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> platelets by flame spray pyrolysis and their characterization // *Ceramics International*. – 2020. – Vol.46. – P. 25512–25519.

306 Cheng J., Ge Y., Wang B., Zhang L., Hu X., Hong S., Liang X., Zhang X. Microstructure and Tribocorrosion Behavior of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al Composite Coatings: Role of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Additi // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2020. – Vol.29. – P. 1741-1751.

307 Патент пайдалы модель 6204 Қазақстан Республикасы, ХПЖ С23С 4/12. Детонациялық жабын жағу тәсілі / Қантай Н., Рахадиллов Б. К., Кәкімжанов Д. Н., Очередыко И. А. өтінім беруші және патент иегері «С.Аманжолов атындағы ШҚУ» КЕАҚ. – №2021/0322.2 өтініш 03.04.2021; басылымға шығарылды 02.07.2021, – 3 б.

## ҚОСЫМША А

Диплом  
Студенттерге, магистранттарға және жас ғалымдарға арналған VII  
Халықаралық ғылыми-техникалық конференция

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН  
ВОСТОЧНО-КАЗАХСТАНСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ Д. СЕРИКБАЕВА

ТӘУЕЛСІЗДІК ЖЫЛДАРЫ  
ҚАЗАҚСТАН  
30  
ЛЕТ НЕЗАВИСИМОСТИ  
КАЗАХСТАН



**ДИПЛОМ**  
**I СТЕПЕНИ**  
НАГРАЖДАЕТСЯ

*Қантай Ғурзамит*

Руководитель: *Рахадиев Б.К.*

**за занятое I место**  
В VII Международной научно-технической конференции  
студентов, магистрантов и молодых ученых  
«ТВОРЧЕСТВО МОЛОДЫХ – ИННОВАЦИОННОМУ  
РАЗВИТИЮ КАЗАХСТАНА»,  
посвященная 30-летию Независимости Республики Казахстан

И.о. Председателя правления-  
ректор  **Ж. Шаймарданов**



г. Усть-Каменогорск, 2021 г.



## ҚОСЫМША Б

«Қазақстан Республикасының өнертабыстарының мемлекеттік тізілімі»  
бөлімінде қолжетімді, авторлық құқықпен қорғалатын пайдалы модельге патент  
№6204, 02.07.2021 жыл.



## ҚОСЫМША В

«Қазақстан Республикасының өнертабыстарының мемлекеттік тізілімі»  
бөлімінде қолжетімді, авторлық құқықпен қорғалатын пайдалы модельге патент  
№6665, 12.11.2021 жыл.



# ҚОСЫМША Г

## Өндіріске енгізу актісі Ғылыми-зерттеу жұмысының нәтижелерін «ӨФ «BEST»» жауапкершілігі шектеулі серіктестігіне енгізу актісі

### ЖШС «ӨФ «BEST»»

Қазақстан Республикасы  
070007 Оскемен қаласы  
Объездное шоссе 7.  
Тел/факс: 8(723-2) 23-05-70  
Факс: 8(723-2) 23-01-08



### ТОО «ПФ «BEST»»

Республика Қазақстан  
070007 г. Усть-Каменогорск  
Объездное шоссе 7.  
Тел/факс: 8(723-2) 23-05-70  
Факс: 8(723-2) 23-01-08

Исх. № 285 от 12.07 2021 г.

### АКТ

#### О промышленном внедрении результатов диссертационной работы Кантай Н.

Разработан и внедрен способ получения градиентного покрытия на основе оксида  $Al_2O_3$  на поверхности металлов в рамках диссертационной работы «Получение детонационных покрытий на основе оксида алюминия и исследование их физико-механических свойств».

Путем заполнения детонационного ствола газом в пределах 53-68% и уменьшения времени задержки при порошковом напылении с 1 с до 0,25 с получен градиентный слой покрытия на основе оксида  $Al_2O_3$ .

- Увеличена длительность работы за счет заполнения ствола газом в пределах 53-68% и уменьшения времени задержки при распылении оксида  $Al_2O_3$  на поверхность детали (металла) с 1 с до 0,25 с;

- получен градиентный слой покрытия на основе оксида  $Al_2O_3$  с помощью однократного дозатора, что приводит к экономии времени и сбережению энергетических ресурсов;

- увеличен срок службы детали (металла) в среднем на 10-15%;

- в результате нанесения на поверхность детали градиентного слоя покрытия на основе оксида  $Al_2O_3$  увеличена твердость в 4-5 раза, трибологические свойства в 2-3 раза, стойкость к эрозии, абразивному износу в 2-3 раза, скорость годовой коррозии уменьшается в 2-3 раза, коэффициент термостойкости имеет постоянное значение.

Разработанный метод получения градиентного покрытия на основе оксида  $Al_2O_3$  - применяется для защиты систем и деталей, подвергающихся одновременно высокой нагрузке и воздействию агрессивных сред, в которых необходимо сочетание высокой стабильности свойств и длительности работы.

Результаты работы рекомендуются к более широкому промышленному внедрению.

Генеральный директор  
ТОО «ПФ «BEST»»



Павлов А. В.

## ҚОСЫМША Ғ

### Оқу процесіне енгізу актісі Ғылыми-зерттеу жұмысының нәтижесін оқу процесіне енгізу актісі



БЕКІТЕМІН  
«Д.Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан  
техникалық университеті» КЕАҚ ҒИД және  
цифрландыру жөніндегі проректоры  
Н. Денисова  
«18» 02 2022 ж.



УТВЕРЖДАЮ  
Проректор по НИД и цифровизации НАО  
«Восточно-Казахстанский технический  
университет им. Д.Серикбаева»  
Н. Денисова  
«18» 02 2022 г.

Қантай Н. Ғылыми-зерттеу жұмысының нәтижелерін ендіруге  
**АКТ**  
внедрения результатов научно-исследовательской работы  
Кантай Н.

Комиссия құрамы:  
Комиссия в составе:  
Төрағасы:  
Председатель:

к.ф.-н., ассоц. профессор Денисова Н.Ф.

Комиссия мүшелері:  
Члены комиссии:

Зам.декана ФБИП Арингожина З.Е.  
Зав.кафедрой физики Табиева Е.Е.

Комиссия Қантай Нұрғамиттың «Алюминий оксиді негізіндегі детонациялық жабындарды алу және олардың физикалық-механикалық қасиеттерін зерттеу» тақырыбындағы ғылыми-зерттеу жұмыстарының нәтижелерін Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті» КЕАҚ «Физика» кафедрасының «Техникалық физика» мамандығы бойынша «Материалдарды модификациялаудың технологиялық үрдісін жасау мен енгізу», «Ионды-сәулелік технологиялардың қазіргі заманғы мәселелері» пәндерін оқытуда қолданылғанын және оқу үрдісіне енгізілгенін растайды.

Ғылыми-зерттеу жұмысының нәтижелерін ендіру алюминий оксиді негізіндегі градиентті және композитті жабындардың құрылым-фазалық күйіне, физико-механикалық, трибологиялық қасиеттеріне, детонация параметрлерінің (Окпанды газға толтыру мөлшері, ату кезіндегі кідіріс уақыты, окпанмен үлгі арасындағы қашықтық және қаптамақшы болған ұнтақ қоспаның түйіршіктер өлшемі) әсерін түсіндіру үшін неғұрлым тереңірек түсініктерді қалыптастырады.

Комиссия подтверждает, что результаты научно-исследовательской работы по теме «Получение детонационных покрытий на основе оксида алюминия и исследование их физико-механических свойств» Кантай Нургамита использованы при изучении дисциплин «Разработка и внедрение технологического процесса модификации материалов», «Современные проблемы ионно-лучевых технологий» специальности «Техническая физика» на учебный кафедре «Физика» НАО «Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева» и внедрены в учебный процесс.

Внедрение результатов научно-исследовательских работ по структурно-фазовому состоянию, физико-механическим, трибологическим свойствам градиентных и композиционных покрытий на основе оксида алюминия, формирует более глубокие понятия для объяснения влияния параметров детонации (количество заполнения ствола газом, время задержки при выстреле, расстояние между образцом со стволом и размер зерен порошковой смеси с покрытием).

Председатель:

к.ф.-н., ассоц. профессор Денисова Н.Ф.

Члены комиссии:

Зам.декана ФБИП Арингожина З.Е.  
Зав.кафедрой физики Табиева Е.Е.

## ҚОСЫМША Д

Зерттеу жұмысы бойынша шетелдік жоғары рейтингке басылымдарда шыққан мақалаларға анықтама

|   |   |   |
|---|---|---|
| <b>ҒЫЛЫМ КОМИТЕТИ</b><br>«ҰЛТТЫҚ МЕМЛЕКЕТТІК ҒЫЛЫМИ-ТЕХНИКАЛЫҚ САРАПТАМА ОРТАЛЫҒЫ» АҚЦИОНЕРЛІҚ ҚОҒАМЫ   |  | <b>КОМИТЕТ НАУКИ</b><br>АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР ГОСУДАРСТВЕННОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЕРТИЗЫ»   |
| 050026, Республика Казахстан<br>Алматы қ., Ботаникай батыр көш., 221<br>Тел.: +7 (727) 378-05-09<br>Email: info@ncste.kz http://www.ncste.kz<br>dn@nti.kz   |   | 050026, Республика Казахстан<br>г. Алматы, ул. Ботаникай батыра, 221<br>Тел.: +7 (727) 378-05-09<br>Email: info@ncste.kz http://www.ncste.kz<br>dn@nti.kz |
| Исх № <u>5708/13-03-03</u><br><u>«28»</u> <u>09</u> <u>2021</u>   |   | <b>Некоммерческое<br/>акционерное общество<br/>«Восточно-Казахстанский<br/>технический университет<br/>им. Д. Серикбаева»</b>                             |
| На № 15-22-12/1371<br>от 06.09.2021 г.  |   |   |
| АО «Национальный центр государственной научно-технической экспертизы» предоставляет информацию о наличии публикаций докторанта ВКТУ им. Д. Серикбаева Кантай Нургамита в научных изданиях, входящих в международные информационные ресурсы Web of Science (Clarivate Analytics) и Scopus (Elsevier).  |   |   |
| 1. «Coatings» (Switzerland), E-ISSN: 2079-6412, годы охвата в Web of Science Core Collection и в Scopus с 2011 года по настоящее время. Предметная область – материаловедение: химия материалов, поверхности, покрытия и пленки, материаловедение, покрытия и пленки, материаловедение, междисциплинарные труды; физика и астрономия: поверхности и интерфейсы, физика, прикладная. |   |   |
| 2. «Materials Research Express» (England), E-ISSN 2053-1591, годы охвата в Web of Science Core Collection и в Scopus с 2014 года по настоящее время. Предметная область – материаловедение: металлы и сплавы, поверхности, покрытия и пленки, полимеры и пластмассы, электронные, оптические и магнитные материалы, биоматериалы; материаловедение, междисциплинарные труды.        |   |   |
| Статья Кантай Н.:   |   |   |
| 1. Kantay N., Rakhadilov B., Kurbanbekov S., Yeskermessov D., Yerbolatova G., Apsezhanova A. Influence of detonation-spraying parameters on the phase composition and tribological properties of Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> coatings // Coatings. – 2021. – Vol. 11, Iss. 7. – Article number 793.  |   |   |
| Статья выявлена в базах Web of Science Core Collection и Scopus. В момент ее опубликования в 2021 году журнал «Coatings» имел Impact Factor за 2020 год равный 2,881 и квартиль по материаловедению, покрытиям и пленкам - Q2, квартиль по материаловедению,  |   |   |

Қосымша материалдардың мақалаларының тізіміне кіргізілуі үшін бізге хабарлаңыз. Біздің мақалаларымыздың тізіміне кіргізілуі үшін бізге хабарлаңыз.

008284

междисциплинарным трудам – Q3, квартиль по физике, прикладной - Q2. Имел CiteScore за 2020 год равный 3,0, процентиль по химии материалов – 58; процентиль по поверхностям, покрытиям и пленкам – 57; процентиль по поверхностям и интерфейсам - 45.

2. Rakhadilov B., Kantay N., Sagdoldina Z., Erbolatuly D., Bektasova G., Paszkowski M. Experimental investigations of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>- And ZrO<sub>2</sub>-based coatings deposited by detonation spraying // Materials Research Express. – 2021. – Vol. 8, Iss. 5. – Article number 056402.

Статья выявлена в базах Web of Science Core Collection и Scopus. В момент ее опубликования в 2021 году журнал «Materials Research Express» имел Impact Factor за 2019 год равный 1,929 и квартиль по материаловедению, междисциплинарным трудам – Q3. Имел CiteScore за 2020 год равный 2,5, процентиль по металлам и сплавам – 65; процентиль по поверхностям, покрытиям и пленкам – 49; процентиль по полимерам и пластмассам – 49; процентиль по электронным, оптическим и магнитным материалам – 42; процентиль по биоматериалам – 32.

**Вице-президент**



**М. Арапов**

*Исп. Р. Абдыкалимова*  
Тел. 8 (727) 378-08-96