

Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті
Коммерциялық емес акционерлік қоғам

ӘОЖ 621.793

Қолжазба құқығында

МАУЛЕТ МЕРУЕРТ

**Ni-Cr-Al негізіндегі детонациялық жабындардың құрылымы мен
қасиеттерінің қалыптасу заңдылықтары**

8D05301 – «Физика»

Философия докторы (PhD)
дәрежесін алу үшін жазылған диссертация

Отандық ғылыми кеңесшілер:
Қауымдастырылған профессор, PhD
Рахадиллов Б.К.
Қауымдастырылған профессор, PhD
Сағдолдина Ж.Б.

Шетелдік ғылыми кеңесші:
Т.ғ.д., профессор Wojciech Wieleba
(Польша).

Қазақстан Республикасы
Өскемен, 2025

МАЗМҰНЫ

НОРМАТИВТІК СІЛТЕМЕЛЕР.....	4
БЕЛГІЛЕР МЕН ҚЫСҚАРТУЛАР.....	5
КІРІСПЕ.....	6
1 Ni-Cr-Al НЕГІЗІНДЕГІ ЖАБЫНДАР БОЙЫНША ӘДЕБИ ШОЛУ.....	10
1.1 Ni-Cr-Al үштік жүйесінің фазалық күй диаграммасы және қасиеттері.....	10
1.2 Ni-Cr-Al негізіндегі беттік қоғаныш қабаттарын алудың әдістері, қолдану салалары және жетілдіру бағыттары.....	18
1.3 Градиентті құрылымды Ni-Cr-Al қоғаныш қабаттарын алудың негіздемесі.....	25
Бөлім бойынша қорытынды және зерттеу міндеттерін қою.....	27
2 ТӘЖІРБИЕЛІК ҚҰРАЛДАР, МАТЕРИАЛДАР ЖӘНЕ ЗЕРТТЕУ ӘДІСТЕРІ.....	28
2.1 Компьютерленген CCDS2000 детонациялық бүрку кешені.....	28
2.2 Төсеніш 12X1МФ болатының құрамы мен сипаттамалары.....	30
2.3 Ni-Cr-Al композитті ұнтағын әзірлеу және олардың морфологиялық-өлшемдік сипаттамалары.....	31
2.4 Үлгілердің құрамы мен құрылымын зерттеу әдістері.....	33
2.5 Үлгілердің механикалық-трибологиялық қасиеттерін зерттеу әдістері.....	34
2.6 Үлгілерді ыстыққа төзімділікке сынау әдістемесі.....	36
Бөлім бойынша қорытынды.....	38
3 ДЕТОНАЦИЯЛЫҚ БҮРКУ ӘДІСІМЕН Ni-Cr-Al НЕГІЗІНДЕГІ ЖАБЫНДАРДЫҢ ҚҰРЫЛЫМЫНЫҢ ҚАЛЫПТАСУ ЗАҢДЫЛЫҚТАРЫН ЗЕРТТЕУ.....	39
3.1 Детонациялық бүрку кезінде Ni-Cr-Al негізіндегі қорғаныш қабаттарының құрылымының қалыптасуын зерттеу.....	39
3.2 Детонациялық бүрку әдісімен Ni-Cr-Al негізіндегі градиентті қорғаныш қабатын алу	45
3.3 Детонациялық бүрку әдісімен алынған Ni-Cr-Al негізіндегі біртекті және градиентті қоғаныш қабаттарының қасиеттерін салыстырмалы зерттеу.....	52
Бөлім бойынша қорытынды.....	61
4 ДЕТОНАЦИЯЛЫҚ БҮРКУ ӘДІСІМЕН АЛЫНҒАН Ni-Cr-Al НЕГІЗІНДЕГІ БІРТЕКТІ ЖӘНЕ ГРАДИЕНТТІ ЖАБЫНДАРЫН ЫСТЫҚҚА ТӨЗІМДІЛІККЕ СЫНАУ.....	63
4.1 Жоғары температуралық тотығуға төзімділікке сынаудан кейінгі Ni-Cr-Al негізіндегі біртекті және градиентті қорғаныш қабаттарын зерттеу.....	63
4.2 Ыстық коррозияға сынаудан кейінгі Ni-Cr-Al негізіндегі біртекті және градиентті қорғаныш қабаттарын зерттеу.....	73
4.3 Жоғары температуралық трибологиялық сынаудан кейінгі Ni-Cr-Al негізіндегі біртекті және градиентті қорғаныш қабаттарын зерттеу.....	78
4.4 Өндірістік ортада өткізілген жоғары температуралық сынақтан кейінгі Ni-Cr-Al негізіндегі біртекті және градиентті қорғаныш қабаттарын зерттеу.....	84

Бөлім бойынша қорытынды	91
ҚОРЫТЫНДЫ	93
ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ	96
ҚОСЫМША А (Пайдалы модельге патент «Функционалды-градиентті жабын алу тәсілі»)	106
ҚОСЫМША Ә (Ғылыми-зерттеу жұмысының нәтижесін оқу үрдісіне енгізу).....	107

НОРМАТИВТІК СІЛТЕМЕЛЕР

Бұл диссертациялық жұмыста келесі стандарттарға сілтемелер қолданылады:

- МЕМСТ ХСҰ 6507-1 – Алмаз ұшын басу арқылы микроқаттылықты өлшеу;
- МЕМСТ 8.748-2011 – Металды қорытпалар. Құралдық ендіру (инденттеу) әдісімен материалдардың қаттылығын және басқа сипаттамаларын өлшеу;
- ASTM G99 – Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus («шар-диск» құрылғысының көмегімен тозуды тексерудің стандартты әдісі);
- ХСҰ 14916 – Thermal spraying — Determination of tensile adhesive strength (жабысу беріктігін анықтау);
- ХСҰ 1302 – Geometrical Product Specifications (GPS) — Indication of surface texture in technical product documentation (беткі кедір бұдырлықты анықтау);
- ХСҰ 20808:2016 – Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics) — Determination of friction and wear characteristics of monolithic ceramics by ball-on-disc method (жоғары температурада тозуға төзімділікке «Шар-диск» схемасы бойынша трибологиялық сынау).

БЕЛГІЛЕР МЕН ҚЫСҚАРТУЛАР

КБО	– Кубтық бүйірлі орталықтанған
СЭМ	– Сканерлік электронды микроскопия
EDS	– Энергия-дисперсиялық спектрометрия
XRD	– Рентгендік дифракция
ЖОЖ	– Жылу оқшаулағыш жабындар
ФГЖ	– Функциональды градиентті жабын
ДБ	– Детонациялық бүрку
ЖЭС	– Жылу электр станциясы
ХСҰ	– Халықаралық стандарттар ұйымы
CSN	– Жеңіл оксидтер

КІРІСПЕ

Зерттеудің жалпы сипаттамасы. Диссертациялық жұмыс Ni-Cr-Al негізіндегі детонациялық жабындардың (қаптамалардың) құрылымы мен қасиеттерінің қалыптасу заңдылықтарын зерттеуге арналған. Детонациялық оқпанды жарылғыш газбен толтыру көлемін 25 %, 30 %, 40 % және 50 % өзгерткен кезде Ni-Cr-Al жабынының морфологиясы мен элементтік құрамы зерттеліп, нәтижесінде детонациялық әдіспен элементтердің таралуы бойынша Ni-Cr-Al негізіндегі элементтердің таралуы бойынша градиентті жабын алу әдісі тағайындалды. Элементтердің таралуы бойынша біртекті және градиентті Ni-Cr-Al детонациялық жабындардың механика-трибологиялық және ыстыққа төзімділік қасиеттеріне салыстырмалы зерттеулер жасалды. Диссертациялық жұмыста алынған нәтижелер жоғары температуралық тотығуға, агрессивті коррозиялық ортаға және қарқынды тозуға ұшырайтын бөлшектерге арналған Ni-Cr-Al негізді қорғаныш жабындарын әзірлеу үшін маңызды.

Зерттеу тақырыбының өзектілігі. Жоғары температурада жұмыс жасайтын бөлшектердің бетіне қорғаныш жабындарын алу қазіргі таңда кең таралған. Ni-Cr-Al жабыны ыстыққа төзімді жабын ретінде энергетика саласында және газ турбиналарының қалақшаларын қорғауда кеңінен қолданылады. Алайда жабын бетінде жеткілікті мөлшерде оксид қорғаныш қабаттарын қалыптастыру үшін жабын алу әдіс тәсілдерін жетілдіру аса маңызды болып табылады. Қорғаныш жабындарын алу технологияларының арасындағы перспективалы әдістердің бері детонациялық бүрку жабын алу технологиясы. Бұл технология жарылғыш газдардың энергиясын пайдалана отырып, кеуектілігі төмен, адгезиялық берктігі жоғары жабындарды алуға мүмкіндік береді. Алайда детонациялық бүрку технологиясымен ыстыққа төзімді Ni-Cr-Al негізіндегі жабын алу бағыты толық зерттелмеген. Осыған орай диссертациялық жұмыстың тақырыбы Ni-Cr-Al негізіндегі детонациялық жабындарының құрылымы мен қасиеттерін зерттеуге арналады және жабын құрамындағы алюминийдің мөлшерін тұрақтандыру өзекті болып табылады.

Жұмыстың мақсаты: Ni-Cr-Al негізіндегі детонациялық жабындардың құрылымы мен қасиеттерінің қалыптасу заңдылықтарын зерттеу және детонациялық әдіспен механикалық и коррозиялық қасиеттері жоғары Ni-Cr-Al негізіндегі градиентті жабын алу әдісін әзірлеу.

Жұмыста қойылған мақсатқа жету үшін келесі **міндеттерді** шешу қажет:

- детонациялық бүрку кезінде Ni-Cr-Al негізіндегі жабын құрылымының қалыптасуын зерттеу;
- детонациялық бүрку әдісімен Ni-Cr-Al негізіндегі элементтердің таралуы бойынша градиентті жабын алу әдісін әзірлеу;
- детонациялық бүрку әдісімен алынған Ni-Cr-Al негізіндегі элементтердің таралуы бойынша біртекті және градиентті жабындардың механика-трибологиялық және ыстыққа төзімділік қасиеттерін салыстырмалы зерттеу.

Зерттеу нысаны – детонациялық бүрку әдісімен алынған Ni-Cr-Al негізіндегі жабындар.

Зерттеу пәні – детонациялық бүрку әдісімен алынған Ni-Cr-Al жабынының құрылымдық-фазалық күйі және механика-трибологиялық, коррозиялық және ыстыққа төзімділік қасиеттері.

Зерттеу әдістері. Жұмыста қойылған міндеттерді орындау келесідей заманауи эксперименттік әдістер жабындардың құрамын, құрылымы мен қасиеттерін зерттеу үшін қолданылды: сканерлік электрондық микроскопия; рентгендік фазалық талдау; микро - және наноинденттеу әдістері; адгезияны жұлып алу әдісімен анықтау; «шар-диск» және «сызықтық ілгерінді-кейінді тозу» схемалары бойынша трибологиялық сынақтар.

Жұмысты орындау кезінде Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университетінің «Беттік инженерия және трибология» ғылыми-зерттеу орталығының, Вроцлав Ғылым және Технологиялар университетінің (Вроцлав қ., Польша) және AGH Ғылым және Технология Университетінің (Краков қ., Польша) зерттеу қондырғылары пайдаланылды.

Зерттеу жұмысының ғылыми жаңалығы:

– алғашқы рет детонациялық бүрку кезінде оқпанды жарылғыш газбен толтыру көлемін өзгеруіне байланысты Ni-Cr-Al негізіндегі жабын құрылымының қалыптасу заңдылықтары анықталды. Жүргізілген кешенді зерттеулер нәтижесінде детонациялық бүрку әдісімен механикалық және коррозиялық қасиеттері жоғары Ni-Cr-Al элементтердің таралуы бойынша градиентті жабынын алудың тәсілі дайындалды. Бұл тәсілдің ерекшелігі детонациялық оқпанды оттегі-ацетилен қоспасымен толтыру көлемін өзгерту арқылы бір дозаторлы детонациялық қондырғыда Ni-Cr-Al негізіндегі градиентті жабынын алу және бұл әдіс Қазақстан Республикасының «Функционалды-градиентті жабынды алу тәсілі» пайдалы модельге арналған патентімен қорғалды (№8922, 07.03.2024 жарияланды);

– алғашқы рет детонациялық бүрку әдісімен алынған элементтердің таралуы бойынша градиентті және біртекті Ni-Cr-Al(20%) жабындарының механика-трибологиялық және ыстыққа төзімділік қасиеттеріне кешенді түрде салыстырмалы зерттеулер жасалды.

Қорғауға шығарылатын негізгі қағида:

1. *Детонациялық бүрку әдісімен NiCr-Al негізіндегі жабындардың қалыптасу заңдылықтары.* Детонациялық бүрку кезінде NiCr-Al(20%) жабынының фазалық құрамын жарылғыш газдар қоспасының көлемін өзгерту арқылы икемді түрде басқаруға болады. Детонациялық оқпанның көлемін арақатынасы $O_2/C_2H_2=1,856$ болатын оттегі-ацетилен жарылғыш газдар қоспасымен 25 % және 30 % толтыру кезінде құрамы CrNi₂, Al және NiAl фазаларынан тұратын жабын қалыптасады, ал жарылыс зарядтың энергиясы 40% және 50% дейін арттырған жағдайда, тек CrNi₂ фазасынан тұратын жабын түзіледі;

2. *Детонациялық бүрку арқылы градиентті жабын алу әдісі.* NiCr-Al(20%) жабынының элементтердің таралуы бойынша градиентті құрылымы біртекті жабынмен салыстырғанда микроқаттылығын және адгезиялық беріктігін шамамен 30%-ға, ал тозуға төзімділігін екі есеге арттырады. Детонациялық оқпанды оттегі-ацетилен қоспасымен ($O_2/C_2H_2=1,856$) толтыру

көлемін 50 %-дан 25 %-ға біртіндеп төмендету, төсеніштен жабынның бетіне қарай Al мөлшері біртіндеп артатын, сәйкесінше Ni мен Cr мөлшері біртіндеп азаятын градиентті құрылымды NiCr-Al(20%) жабынның қалыптасуын қамтамасыз етеді;

3. *Элементтердің таралуы бойынша градиентті NiCr-Al(20%) жабынының ыстыққа төзімділігін зерттеу нәтижелері.* Градиентті құрылымды NiCr-Al(20%) жабындарының жоғары температураға төзімділігі біртекті құрылымды жабындармен салыстырғанда айтарлықтай жоғары, бұл жабын мен төсеніш арасындағы термиялық ұлғаю коэффициенттерінің үйлесімділігі мен ішкі тотығу процестерінің тежелуімен түсіндіріледі. Зертханалық және өндірістік жағдайда NiCr-Al(20%) жабынын жоғарғы температуралық тотығуға сынау нәтижелері градиентті жабындардың беткі қабаттарында Al сақталу нәтижесінде Al_2O_3 қорғаныш оксид қабаттарын түзілуін анықтап, жоғары температуралық трибологиялық сынақ нәтижелері, градиентті жабынның тозуға төзімділігі біртекті композициялық жабынымен салыстырғанда шамамен 2,5 есе жоғары екенін анықтады.

Практикалық маңыздылығы. Диссертациялық жұмыста алынған нәтижелер энергетикалық машинажасау саласындағы жабдықтардың қызмет мерзімін ұлғайту мақсатында жоғары температуралы және агрессивті коррозиялық ортада тотығу мен қарқынды тозуға төзімді қорғаныш жабындарын әзірлеу үшін қолдануға болады.

Жұмыстың ғылыми-зерттеу жобаларымен байланысы. Диссертациялық жұмыс ғылым дамуының «Энергия, озық материалдар және көлік» басым бағытына сәйкес ҚР ҒЖБМ Ғылым комитеті қаржыландыратын келесі гранттық жобалар мен нысаналы- қаржыландыру бағдарламасы негізінде орындалды:

– AP08957765 «Жылу энергетикалық жабдықтарының жоғары температуралы элементтерін коррозиядан қорғау үшін Ni-Cr-Al негізіндегі функционалды градиент жабындарын жасау», 2020-2021 жылдарға арналған гранттық қаржыландыру;

– AP22688426 «NiCrAl негізіндегі детонациялық жабынның қорғаныштық қасиеттерін арттыру», 2024-2026 жылдарға арналған «Жас ғалым» жобасы бойынша жас ғалымдарды гранттық қаржыландыру;

– BR24992876 «Құралдар, машина мен жабдықтар бөлшектерінің эксплуатациялық қасиеттерін арттыру үшін беттік өңдеу және композициялық қорғаныш жабындарын алу технологияларын әзірлеу және апробациялау», 2024-2026 жылдарға арналған бағдарламалық-нысаналы қаржыландыру.

Автордың жеке үлесі. Автордың жеке үлесі тәжірбие-зерттеу жұмыстарын жүргізу, диссертацияда алынған нәтижелерді талдау, ғылыми мақалалар жазу. Диссертациялық жұмыстың мақсаты мен міндеттерін айқындау, негізгі қорытындыларды тұжырымдау ғылыми кеңесшілермен бірлесіп жүргізілді.

Нәтижелердің негізділігі мен сенімділік дәрежесі. Диссертациялық жұмыста жабындардың құрылымдық-фазалық күйлері мен механика-трибологиялық және ыстыққа төзімділік қасиеттерін зерттеудің заманауи әдістері

колданды. Диссертацияда жүргізілген зерттеу нәтижелері белгілі ғылыми түсініктер мен нәтижелерге қайшы келмейді.

Ғылыми еңбектердің апробациясы. Диссертацияның негізгі нәтижелері келесі ғылыми шараларда баяндалады және талқыланады: 2020 IEEE 10th International Conference on «Nanomaterials: Applications & Properties», Sumy, Ukraine, November 9-13, 2020; Международной научно-технической молодежной конференции «Перспективные материалы конструкционного и функционального назначения», г. Томск, Россия, 20-24 ноября 2023 г; Международную научно практическую конференцию: «Интеграция энергетики и машиностроения: инновационные технологии и практики», г. Алматы, Казахстан, 24 ноября 2023г; Materials of International Practical Internet Conference «Challenges of Science», г. Алматы, Казахстан, 22 ноября 2023; сондай-ақ, Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университетінің «Беттік Инженерия және трибология" ғылыми-зерттеу орталығының және ЖШС «PlasmaScience» ғылыми-өндірістік фирмасының ғылыми семинарларында талқыланды.

Жарияланымдар. Диссертация тақырыбы бойынша 18 жұмыс жарияланды, оның ішінде Web of Science және Scopus дерекқорларында индекстелетін рецензияланатын ғылыми басылымдарда 2 мақала, Қазақстан Республикасының Ғылым және жоғары білім саласындағы сапаны қамтамасыз ету комитеті ұсынылған журналдарда 7 мақала, Халықаралық конференциялар материалдарында 8 жұмыс және Қазақстан Республикасының пайдалы моделіне 1 патент.

Диссертацияның құрылымы мен көлемі. Диссертациялық жұмыс кіріспеден, төрт тараудан, қорытындыдан, 138 пайдаланылған әдебиеттер тізімінен және 2 қосымшадан тұрады. Диссертацияның жалпы көлемі 108 бет, оның ішінде 62 сурет және 10 кесте.

1 Ni-Cr-Al НЕГІЗІНДЕГІ ЖАБЫНДАР БОЙЫНША ӘДЕБИ ШОЛУ

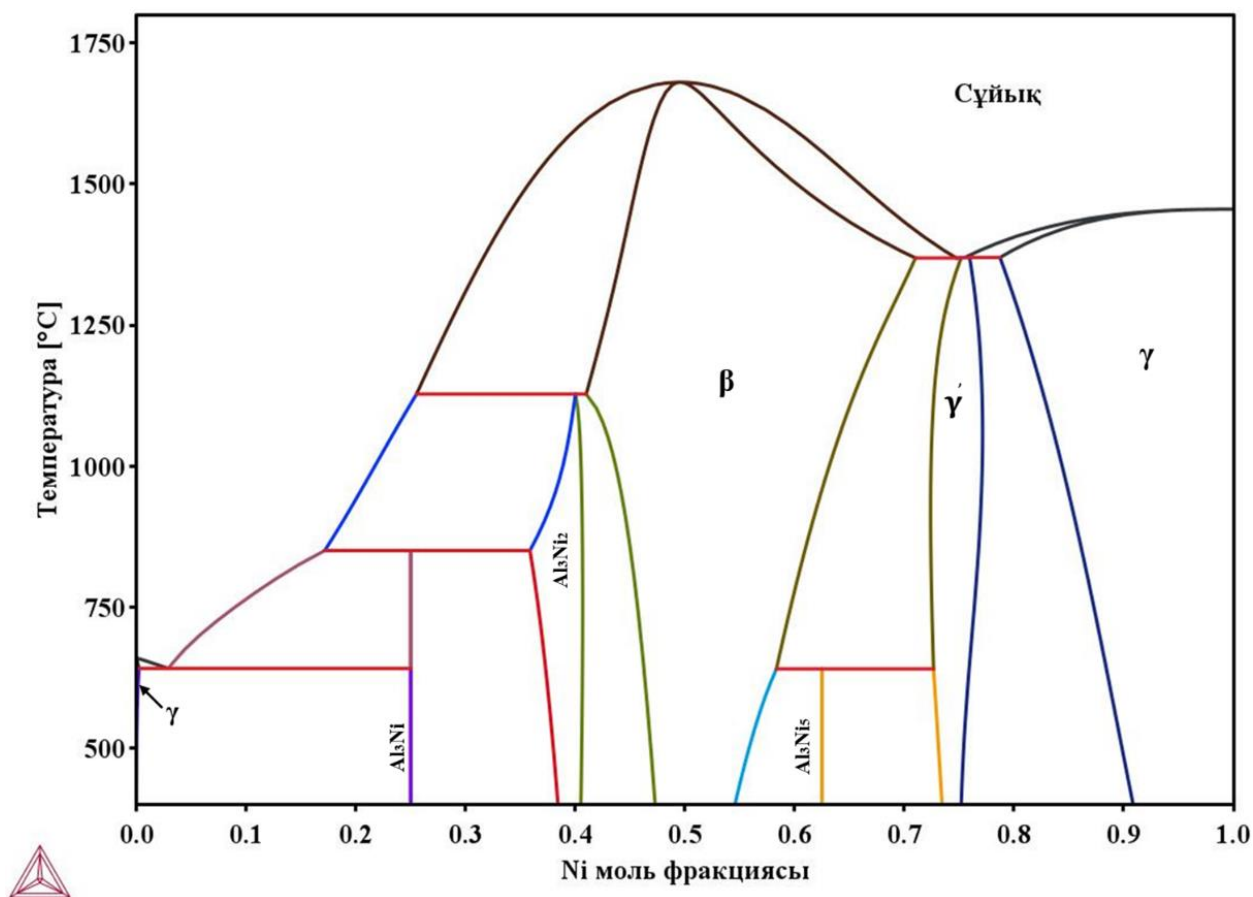
Бұл тарауда Ni-Cr-Al жүйесінің құрылымдық-фазалық күйі, оның жоғары температуралық төзімділігі, механикалық және трибологиялық қасиеттері жан-жақты талданып, кеңінен сипатталды. Сонымен қатар, Ni-Cr-Al негізіндегі жабындарды алу әдіс-тәсілдері және оларды алудың заманауи технологиялары салыстырмалы түрде талқыланды. Ni-Cr-Al негізіндегі градиентті қаптама алудың перспективасы қарастырылып, оның әр түрлі салада қолдану аймақтары көрсетілді. Ni-Cr-Al жүйесінің жабын ретінде қолданылуындағы негізгі артықшылықтары, алу және қолдану кезіндегі негізгі туындайтын мәселелері анықталды. Осы зерттеуде Ni-Cr-Al негізіндегі қаптамаларды детонациялық бүрку әдісімен алудың артықшылықтары ерекше назарға алынды. Бұл әдістің технологиялық мүмкіндіктері мен перспективалары, сондай-ақ оның қаптама құрылымына, фазалық құрамына және эксплуатациялық қасиеттеріне әсері бағаланды. Жүргізілген ғылыми әдеби шолу негізінде диссертациялық жұмыстағы зерттеудің негізгі бағыттары мен міндеттері айқындалып, Ni-Cr-Al негізіндегі градиентті жабын алуды жетілдіруге бағытталған ғылыми-практикалық мәселелер тұжырымдалды.

1.1 Ni-Cr-Al үштік жүйесінің фазалық күй диаграммасы және қасиеттері.

Ni-Cr-Al жүйесі Ni негізіндегі жоғары температураға төзімді қорытпалар үшін ең маңызды үштік жүйелердің бірі болып табылады. Бұл үштік жүйе кеңінен зерттелген және оның фазалық құрамы мен құрылымдық ерекшеліктері жоғары температуралық қолдану аймақтары үшін ерекше маңызға ие. Бұл үштік жүйе мынандай негізгі фазалардан тұрады: γ -фаза – кубтық бүйірлі орталықтанған (КБО) Ni қатты ерітіндісі; γ' (γ -prime) фаза – Ni_3Al негізіндегі КБО интерметалдық қосылысы. Ni-Cr-Al жүйесіндегі тұрақты фазалардың кристалдық құрылымы Yao Wang және әріптестерінің [1] зерттеуінде қарастырылған. Бұл жүйенің фазалық құрамын тереңірек түсіндіру үшін оның негізгі құрамдас бөліктері – Al-Cr, Al-Ni және Cr-Ni бинарлық жүйелері егжей-тегжейлі зерттелген. Бұл қосалқы жүйелер эксперименттік және теориялық тұрғыда мұқият талданып, олардың термодинамикалық және фазалық күй диаграммалары анықталған. Диссертацияда Ni-Cr-Al жүйесі мен оның негізгі құрамдас бөліктері (Al-Cr, Al-Ni және Cr-Ni) Thermo-Calc бағдарламасының 2024 жылғы деректер базасын қолданып қайта құрастырылды.

Al-Cr бинарлық жүйесі жоғары температураға төзімді қорытпаларда маңызды рөл атқарады. Бұл жүйеде бірнеше интерметаллидтік фазалар бар, олардың кейбіреулері эксперименттік және теориялық зерттеулермен бірнеше рет расталған. Grushko B және әріптестері [2] зерттеуінде алғаш рет сипатталған $\text{Cr}_4\text{Al}_{11}$ фазасы шамамен 973–1073 K аралығында CrAl_4 және Cr_5Al_8 -L фазалары арасындағы перитектоидтық реакция нәтижесінде түзілетіні көрсетілген. Қазіргі уақытта Cr 30-42 ат.% аралығындағы тұрақты фазаларға қатысты ғылыми пікірталастар жалғасуда. Алайда, Cr-ға бай фазалық аймақ бойынша зерттеушілер арасында біркелкі келісім бар, бұл аймақта Cr_2Al фазасы қатты

сипаттамаларын әртүрлі авторлар зерттеген [5-9]. Олардың зерттеулері Al-Ni жүйесінің термодинамикалық тепе-теңдік күйін нақтылау, фазалық өзгерістерді болжау және оның Ni-Cr-Al үштік жүйесіндегі орны туралы маңызды мәліметтер береді.

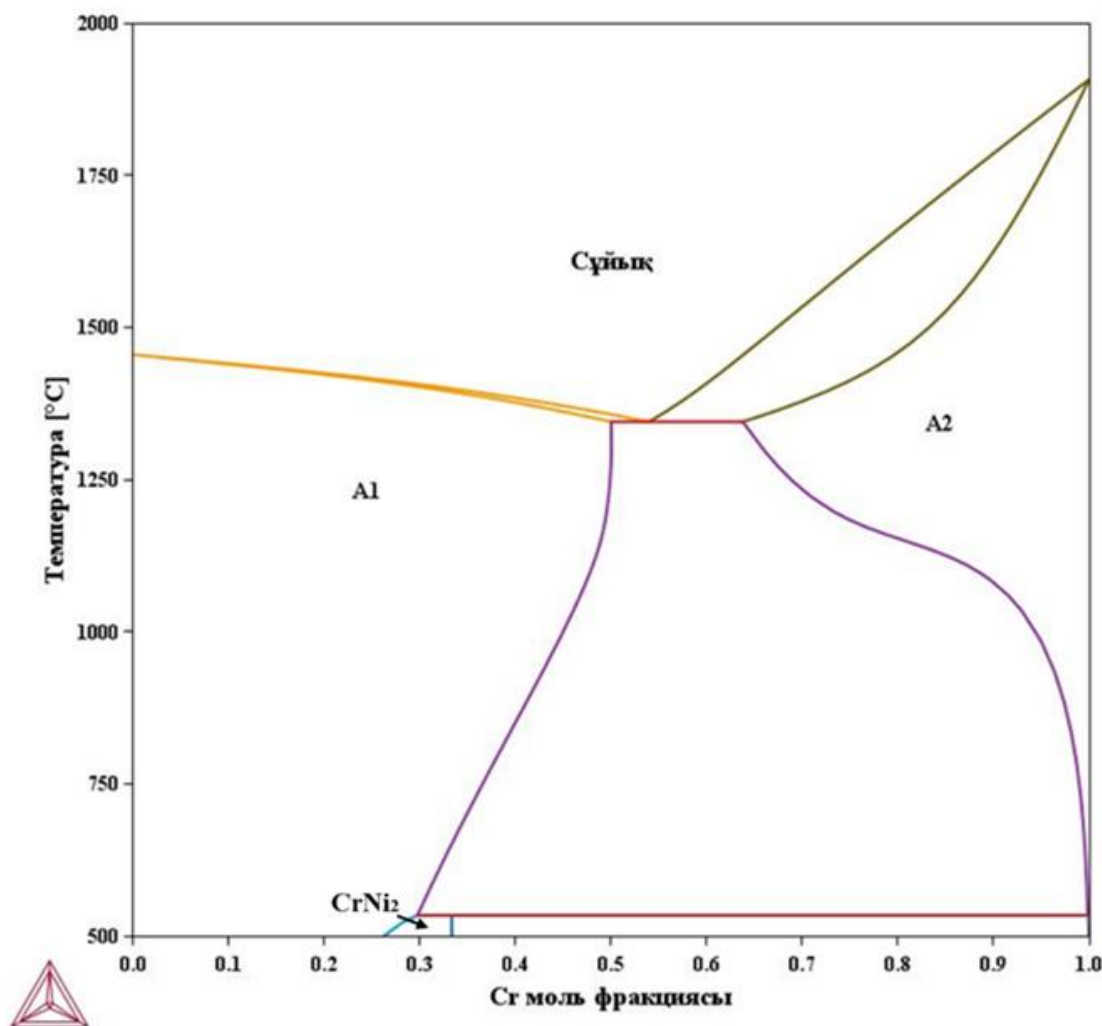


Сурет 1.2 – Thermo-Calc бағдарламасының көмегімен модельденген Al-Ni жүйесінің фазалық күй диаграммасы

Cr-Ni бинарлық жүйесі жоғары температурада қарапайым эвтектикалық жүйе болып табылады және оның фазалық тепе-теңдіктері жақсы зерттелген. 1.3-суретте Cr-Ni жүйесінің фазалық күй диаграммасы көрсетілген. Cr-Ni жүйесіндегі негізгі фаза бұл CrNi₂ фазасы. Бұл фаза шамамен 600 °C және одан да жоғары температураларда термиялық өңдеу параметрлеріне байланысты түзіледі. CrNi₂ фазасы жақсы механикалық беріктік пен жоғары температурға төзімділікті қамтамасыз ететін КБО кристалдық құрылымға ие. CrNi₂ фазасы қорытпалардың қаттылығын арттырады және олардың коррозияға төзімділігін жақсартады [10-11]. Сонымен қатар, Cr-Ni бинарлық жүйесінде 900 K төмен температураларда перитектоидтық реакция нәтижесінде CrNi₃ аралық фазасы түзіледі [12].

Cr-Ni жүйесін алғаш рет Густавсон А. [13] субтұрақты ерітінді моделін қолдана отырып бағалаған. Бұл модель жүйедегі барлық зерттелген фазаларға (сұйық және қатты ерітінділерге) қолданылған. Кейінірек Ли және әріптестері [14] бұл жүйені қайта бағалап, Ni-Cr-C жүйесін сипаттау мақсатында терең

зерттеулер жүргізді. Екі зерттеу де Cr-Ni фазалық диаграммасын және оның термодинамикалық деректерін қанағаттанарлықтай сипаттай алды. Кейінгі зерттеулерде 856 K төмен температурада тұрақты болатын CrNi_2 фазасы қайта қарастырылып, Turchi және әріптестері [15] оны өз еңбектерінде қамтыды. Бұл зерттеулер Cr-Ni жүйесінің термодинамикалық және фазалық сипаттамаларын нақтылап, оның жоғары температуралық қорытпалардағы рөлін терең түсінуге мүмкіндік берді.



Сурет 1.3 – Thermo-Calc бағдарламасының көмегімен модельденген Cr-Ni жүйесінің күй фазалық диаграммасы

Ni-Cr-Al жүйесіндегі фазалық тепе-теңдіктер көптеген зерттеушілер тарапынан жан-жақты зерттелген [16-18]. Бұл жүйенің фазалық құрамын және оның тұрақтылық аймақтарын түсіну жоғары температуралық қорытпаларды жобалау үшін ерекше маңызды. Алғаш рет 1982 жылы Tu D.C. [19] өз еңбегінде $\text{Cr}_{15}\text{Ni}_{10}\text{Al}_{75}$ құрамды Ni-Cr-Al үштік жүйесін зерттеген. Ni-Cr-Al жүйесіндегі үштік фаза 900 °C температурада металлографиялық әдістер арқылы бір фазалы күйде дайындалды, алайда оның кристалдық құрылымы анықталмады. Кейінгі зерттеулерде, атап айтқанда Rosell L.E. [20] еңбектерінде, осы үштік фаза A1 мөлшері жоғары қорытпаларда да түзілетіні көрсетілді. Zajusz M. және тағы

басқа [21] жұмысында Ni-Cr-Al жүйесінің көпфазалы диффузиялық процесті эксперименттік және модельдік тұрғыда зерттеген. Көптеген зерттеулер никельге бай аймаққа бағытталған, себебі бұл аймақ ыстыққа төзімді қорытпалар мен диффузиялық жабындарды алуда кеңінен қолданылған. Saliesh M. және әріптестері Al-Cr-Ni жүйесінің никельге бай аймағы бойынша қатты күйдегі фазалық тепе-теңдіктері мен кристаллдық құрылымдарын сипаттау бойынша шолу мақаласын жариялаған [22]. Kitajima және әріптестері [23] 1423 K температурада никельге бай фазалық тепе-теңдіктерді зерттеді. Бұл зерттеулерде B2 және L12 фазаларының ерігіштік аймақтары, сондай-ақ B2-A2 (Cr), B2-L12, B2-Al және L12-Al фазалық байланыс сызықтары анықталды. Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, Cr-ның максималды ерігіштігі Ni_3Al фазасында шамамен 9 ат.%, ал NiAl фазасында шамамен 17 ат.%. Бұл нәтижелер Ni-Cr-Al жүйесіндегі фазалық тұрақтылық пен ерігіштік шекараларын тереңірек түсінуге мүмкіндік берді. Сондай ақ Oforka N.C. және әріптестері [24] осы 1423 K температурада Ni-Cr-Al қорытпалараның термодинамикалық сипаттамаларын анықтау арқылы олардың фазалық тұрақтылығын, белсенділіктерін және энергетикалық қасиеттерін жүйелі түрде сипаттаған. Ал Nesbitt және әріптестері [25] Ni-Cr-Al жүйесіндегі никельге бай қорытпалардың диффузия, яғни элементтердің өзара ену процестерін зерттеп, γ (Ni қатты ерітінді), γ' (Ni_3Al), β (NiAl), α (Cr фазасы) секілді фазалар арасындағы шекаралар мен олардың өзгерісі қарастырылды және $\gamma/\gamma + \beta$ фазалық шекаралары анықталды.

Al-Cr-Ni үштік жүйесінің алюминийге бай аймағындағы бинарлық фазалардың үштік ерігіштігі мен үштік фазалардың түзілуі бірқатар зерттеулерде қарастырылған. Grushko, Weitzer және басқа да зерттеушілер бұл аймақтың фазалық құрылымын, изотермиялық кесінділер мен инвариантты реакцияларды егжей-тегжейлі зерттеген [26-27]. Weitzer және әріптестері [26] энергия-дисперсиялық рентгендік талдау (EDXA), рентгендік дифракция (XRD), дифференциалды термиялық талдау (ДТА, 1773 K дейін) және металлография әдістерін қолданып, 50 ат.% Al аймағындағы Al-Cr-Ni жүйесінің ликвидус проекциясын анықтады. Бұл зерттеу 973 K температурасында Al-ге бай бөліктегі фазалық қатынастарды нақтылап, ішінара реакция схемасын ұсынды. Grushko және әріптестері [27] Al-Cr-Ni жүйесіндегі үштік қосылыстар мен бинарлық фазалардың үштік ерігіштігін зерттеген. Олардың жұмыстары Al-Cr бинарлық фазасында Ni ерігіштігін келесі мөлшерде анықтады: $\text{Cr}_7\text{Al}_{45}$ үшін 2 ат.% Ni, CrAl_4 және CrAl_5 үшін 1 ат.% Ni, Cr_3Al_8 үшін 3 ат.% Ni. Сонымен қатар, Al-Ni бинарлық фазаларының Cr еріту қабілеті зерттелді: NiAl₃ шамамен 1 ат.% Cr ерітеді, Ni₂Al₃ шамамен 3 ат.% Cr дейін ерітеді. Grushko және әріптестері [28] Al-Cr-Ni жүйесінің алюминийге бай аймағындағы фазалық қатынастарды бірнеше изотермиялық кесінділер арқылы зерттеген. Бұл кесінділер 973 K, 1073 K, 1173 K, 1273 K, 1298 K және 1423 K температураларында алынған. Бұл зерттеулер Al-Cr-Ni жүйесінің алюминийге бай бөлігіндегі фазалық тұрақтылықты тереңірек түсінуге мүмкіндік беріп, үштік қорытпаларды жобалау мен жетілдіруге негіз болды.

Ni-Cr-Al жүйесінің фазалық тепе-теңдігі мен термодинамикалық қасиеттері әртүрлі зерттеулерде жан-жақты қарастырылған [29-31]. Бұл жүйенің

термодинамикалық модельдеуі арқылы алынған нәтижелер Ni-Cr-Al қорытпаларының фазалық күйін болжау және жоғары температуралық қолдану аймақтарын анықтау үшін маңызды. Ниа [32] зерттеуінде термодинамикалық модельдеу негізінде Ni-Cr-Al жүйесінің жаңа термодинамикалық сипаттамасы ұсынылды. Бұл модельдеу Thermo-Calc бағдарламалық пакетін қолдану арқылы жүзеге асырылып, үштік жүйеге арналған термодинамикалық параметрлердің екі түрлі жиынтығы алғаш рет әдебиетте жарық көрді. Тұрақты температура контурлары 100 °C интервалымен беріліп, фазалық ауысулардың жылулық сипаттамалары анықталған. Thermo-Calc бағдарламасы арқылы Ni-Cr-Al жүйесінің 900 °C температурадағы фазалық шекаралары анықталып [33], Cr элементінің γ (Ni қатты ерітіндісі) + γ' (Ni_3Al) фазалық аймағына әсерін зерттелген. Ni-Cr-Al үштік жүйесінің фазалық тепе-теңдіктері мен термодинамикалық қасиеттерін CALPHAD әдісі арқылы қайта бағалау жұмысын Wang Y және т.б. ғалымдар жүргізді [1]. Зерттеу жұмысында әр фаза үшін субтұрақты модельдер таңдалған. B2 (NiAl) және L12 (Ni_3Al) фазалары үшін «Order-disorder» модельдері пайдаланылған. Барлық фазалар үшін термодинамикалық параметрлерді есептеу және модельдеу жүргізілген. Әр түрлі температурлардағы (973 K-1573 K) изотермиялық қималар есептелген. Ni-Cr-Al сұйықтық фазасының беттік проекциясы жасалған. Тұтас Гиббс энергиясы, түзілу және араласу энтальпиясы есептеліп, әдеби деректермен салыстырылған. Жалпы есептеулер мен деректер арасында жақсы сәйкестік бары айтылды.

Thermo-Calc бағдарламасының 2024 жылғы жаңартылған деректер базасымен есептелген Ni-Cr-Al жүйесінің ликвидус проекциясы 1.4-суретте көрсетілген. Бұл проекция жүйенің балқу температуралары мен фазалық тұрақтылық аймақтарын көрсетеді, сондай-ақ жүйе құрамының өзгеруіне байланысты фазалардың қалыптасу реттілігін сипаттайды. 1.4-суреттегі Ni-Cr-Al компоненттерінің аз концентрация аймағы үлкейтіліп көрсетілген. Мұнда 1173-1873 K температура аймағы белгіленген. Бұл аймақта CrNi_2 , AlCr , AlNiCr және тағы басқа фазалары түзілген. 1.4-суретте жоғары температуралық фазалық тұрақтылық шекаралары мен интерметалидтік қосылыстардың түзілу аймақтарын жақсы көруге болады. Бұл диаграммада CrNi_2 фазасы тікелей белгіленбеген, Cr-Ni-Al жүйесінде күрделі фазалық түрленулер негізіндегі AlNiCr , AlCr , Al_8Cr_5 фазалары түзілген. Бұл фазалардың түзілу температуралары 1200K (927 °C) бастап 1873K (1600 °C) дейінгі аралықты қамтиды. Бұл диаграмма негізінде Cr-Ni-Al жүйесіндегі фазалардың температураға, құрамға тәуелділігін көруге болады. CrNi_2 фазасы қалыптасуы үшін хром мен никельдің мольдік фракциялары белгілі бір шекке дейін жетуі керек, ал температура 600 °C-тан жоғары болуы тиіс. Алюминий қосылған кезде қосымша AlCr , Al_3Cr сияқты фазалар пайда болып, фазалық тепе-теңдік күрделене түседі. Ni-Cr-Al жүйесіндегі алғашқы кристалдану фазаларының ішінде ең маңыздысы Ni негізіндегі қатты ерітінді, Cr негізіндегі қатты ерітінді және B2 фазасы (NiAl) – жоғары температуралық беріктікке ие интерметалдық қосылыс.

Ni-Cr-Al жүйесіндегі интерметалдық қосылыстар ерекше күрделі жұмыс жағдайларында жоғары эксплуатациялық төзімділігімен, құрылымдық және фазалық тұрақтылығымен, сондай-ақ жақсы технологиялық жарамдылығымен ерекшеленеді, бұл өнеркәсіптік қолдану үшін өте маңызды. Интерметалдық қосылыстар негізінде алынған жабындар жоғары температуралық ортада коррозияға және тотығуға төзімділігімен ерекшеленеді. Никель алюминидтері негізіндегі жабындар жоғары температурада беткі қабатының тотығу нәтижесінде Al_2O_3 алюминий оксидінен тұратын қорғаныс қабатын түзу қабілетіне ие. Бұл жабындар материалдарды жоғары температуралық тотығу мен коррозиялық бұзылудан тиімді қорғауды қамтамасыз етеді. Осыған байланысты Ni-Cr-Al негізіндегі қорғаныш жабындарын алу және олардың жоғары температуралық тұрақтылығын зерттеу маңызды ғылыми мәселе болып табылады. Жабындарды алу үшін Ni₂₂Cr₁₁Al композитті ұнтағы 1100 °C, 1050 °C және 1100 °C температурада ұшқын плазмалық синтездеу әдісімен ұнтақ металлургия технологиясы арқылы дайындалды. Жоғары температуралық тотығу сынақтарынан кейінгі микрорентгендік талдау нәтижелері жабынның бетінде қорғаныш оксидті қабаттарының түзілуін растады [34]. Mohammad Sakhawat Hussain және т.б. ғалымдар [35] жылу оқшаулағыш жабындарын (ЖОЖ) алу үшін пайдалануға жоғары энергиялы шарлы диірменді қолданып, нано-кристалды Ni, Cr, және Al ұнтақтарын алған. Осылайша, Ni-Cr-Al жүйесі негізіндегі ұнтақтар синтезделіп, олардан алынған жабындардың жоғары температуралық беріктігі мен тотығуға төзімділігі зерттелді. Бұл жабындар экстремалды жағдайларда жұмыс істейтін бөлшектердің қызмет мерзімін ұлғайтуға және олардың сенімділігін арттыруға мүмкіндік береді.

Зерттеулер [36-39] көрсеткендей, Al-Ni негізіндегі жабындардың практикалық қолдану температуралық диапазоны 700-800 °C аралығында. Температураның одан әрі жоғарылауы кезінде жабындағы Al концентрациясының төмендеуі оның никельдегі ерігіштігі және тотығу процестері салдарынан жылдам жүреді, бұл өз кезегінде жабынның тотығуға төзімділігінің төмендеуіне, яғни қызмет мерзімінің төмендеуіне әкеледі. Белгілі болғандай, Al мөлшерін арттыру және температураны жоғарылату Al_2O_3 оксидінің түзілуіне ықпал етеді, ол төсеніш материалды жоғары температуралық тотығудан тиімді қорғайды. 800 °C температурада үздіксіз Al_2O_3 қабатын қалыптастыру үшін жабында шамамен 6,5-7,0 масс.% Al болуы қажет. Алайда 1000 °C және 1100 °C температураларда алюминий концентрациясының айтарлықтай төмендеуі бірнеше мың немесе жүздеген сағаттан кейін орын алып, бұл жабынның тотығуға төзімділігін әлсіретіп, оның қызмет ету мерзімін шектеуге әкеледі. Бұл деректер осы NiCr-Al жабындарының жоғары температуралық қолдану аймағын оңтайлы таңдау және олардың жұмыс жасау жағдайларын жақсарту үшін маңызды болып табылады.

NiCr-Al жабындарының жоғары температуралық төзімділігімен қатар, көптеген жұмыстарда олардың механика-трибологиялық қасиеттерін зерттеу жұмыстары жүргізілген. Зерттеулердің бірінде лазермен алынған Ni-Cr-Al жабынында Ni-ге бай аморфты құрылымдар мен Ni₃Al кристаллиттері түзілгені анықталды. Сонымен қатар, аморфты құрылымның трибологиялық қасиеттерге

әсері зерттеліп, оның тозуға төзімділікті жақсартатыны дәлелденді. Зерттеу нәтижелері аморфты құрылымның мөлшері 2,18 %-дан 31,1 %-ға дейін артқан кезде, тозу кезіндегі үлгі көлемі шамамен 3,6 есе азайғанын көрсетті [40]. Yang X және оның әріптестері [41] Ni–7Cr және Ni–7Cr–2Al нанокөміршіктік жабындарының микроқұрылымын, үйкеліс коэффициентін және тозу қарқындылығын зерттеді. Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, Al нанобөлшектерінің жабынның микроқаттылығы мен тозуға төзімділігін айтарлықтай арттыруы, беткі қабатта аморфты оксидтердің түзілуімен және Al_2O_3 нанобөлшектерінің дисперсиялық беріктендіру эффектісіне байланысты екені анықталды. Сонымен қатар, Zhao X және оның әріптестері [42] NiCrAl жабындарына электрохимиялық сынақтар жүргізіп, жабынның коррозияға төзімділігі жоғары екенін анықтады.

Осылайша Ni–Cr–Al жүйесінің ғылыми және технологиялық маңыздылығы оның жоғары температуралық қасиеттерін зерттеуге арналған көптеген эксперименттік және теориялық жұмыстармен дәлелденген. Бұл жүйе жоғары температураға төзімді, перспективалы материалдардың бірі болып табылады. Ni–Cr–Al жүйесінің фазалық құрылымдары мен жоғары температуралық механика-трибологиялық қасиеттерін кешенді зерттеу оның қолданыс аймағын кеңейтуге мүмкіндік береді.

1.2 Ni–Cr–Al негізіндегі беттік қорғаныш қабаттарын алудың әдістері, қолдану салалары және жетілдіру бағыттары

Ni–Cr–Al үштік жүйесін өте жоғары температурада (1000 °C-тан жоғары) жұмыс істейтін қондырғылардың бөлшектерін қорғау үшін жабын ретінде немесе ыстыққа төзімді жабындардың адгезиялық беріктігін арттыру үшін аралық жабын ретінде қолдану кеңінен таралған. Ni–Cr–Al жабынының қорғаныс қабілеті негізінен Al_2O_3 оксидті қабатының түзілуіне байланысты. Оксидті қабаттың өсуі нәтижесінде жабынның құрамы мен оның жоғарғы температураға төзімді қорғаныштық қасиеттері артады [43-44]. 1980-жылдардың ортасында Foster және т.б. [45] және Honey және т.б. [46] алғаш рет алдын ала легірілген, Cr және Al элементтеріне бай Ni немесе Co матрицасы негізіндегі композициялық жабын алуды гальваникалық ертіндіден электрлік тұндырып (ED-electrodeposition), артынша термиялық өңдеу арқылы алуды ұсынды. Қазіргі таңда NiCrAl жабындарын алу үшін тұндыру әдістері және термиялық бүрку әдістері қолданылады.

Liu Z. және оның әріптестері еңбектерінде [47] Ni–20Cr–3Al жабыны магнетронды бүрку технологиясымен алынып зерттелді. Микрокристалды Ni–Cr–Al жабынын 1100 °C температурада циклді тотығуға зерттеген кезде $\alpha-Al_2O_3$ және Cr_2O_3 тотығу қабығы түзіліп, жабынның жоғары температурада тотығуға тұрақтылығы жақсарған. M. Seraffon және т.б. [48-49] магнетронды тұндыру әдісімен NiCrAl және NiCoCrAl жабындарын жылу оқшаулағыш жабындарды (ЖОЖ, ағылшын тілінде Thermal Barrier Coating) алу үшін аралық байланыстырушы қабат ретінде зерттеді. Зерттеу нәтижесінде 900 °C температурада ыстық коррозия мен тотығуға сыналған NiCrAl жабынында құрамында Cr және Al жеткілікті болғанда Al_2O_3 және Cr_2O_3 сияқты қорғаныс

кабілеті жоғары оксидтер жабын бетінде түзілетіні анықталды. Ал NiCoCrAl жабынының құрамындағы Cr және Al элементтердің мөлшерінің аз болуына байланысты жабын беттерінде зиянды оксидтер болып табылатын шпинельдер көптеп қалыптасқан. Өз зерттеулерінде олар Cr және Al элементтерінің мөлшерін реттеу арқылы температура 900-950 °C аралығында жұмыс жасайтын өндірістік газтурбиналарының бетіне NiCrAl немесе NiCoCrAl жабындарын байланыстырушы жабын ретінде алу ұсынылған.

NiCrAl жабындарын электрохимиялық тұндыру әдістерімен алу бойынша да көптеген зерттеу жұмыстары бар. Yang және т.б. [50] еңбегінде Cr және Al нанобөлшектерін электрохимиялық тұндыру технологиясымен нанокристалды никель матрицасына енгізу арқылы Ni-Cr-Al жабынын алды. Мақалада жабын тотығуға төзімділікке сыналып, олардың тұрақты қорғаныс оксид қабатын (Al_2O_3 немесе Cr_2O_3) қалыптастыру қабілеттері зерттеп, NiCrAl жабынын газ турбиналарының құрылымдық бөлшектеріне ЖОЖ байланыстырушы қабат ретінде қолдануда перспективалы екенін айтқан. Келесі жұмыста [51] NiCrAl композициялық жабыны Ватт ваннасында тұрақты ток жағдайында электрохимиялық тұндыру әдісі арқылы алынды. Гальваникалық композициялық жабынды математикалық модельдеу жабындардың құрамын болжауға мүмкіндік береді. Алынған болжамды мәндер эксперименттік мәндерге жақын болды. Yang, X және т.б. ғалымдар [52] электрохимиялық тұндыру әдісімен алынған Ni-Cr-Al нанокompозитті жабындарының микроқұрылымы мен тозуға төзімділігіне Al нанобөлшектерінің әсерін зерттеді. Al нанобөлшектері жабын бетіндегі кедір бұдырлықты азайтып, Cr және Al бөлшектерінің біркелкі таралуын қамтамасыз ететіні зерттеу барысында анықталған. Сонымен қатар Al нанобөлшектері бетінде аморфты Al_2O_3 қабаты қалыптасты, бұл дисперсиялық қатайту әсерін беріп, дислокация қозғалысын тежейді. Жабынның тозуға төзімділігі жақсарып, микроқаттылығы артқан.

Huijuan Zhen және Xiao Peng еңбектерінде [53-54] NiCrAl негізіндегі тотығуға төзімді жабындарды алудың жаңа әдісін, яғни PVD (Physical Vapor Deposition) әдісімен салыстырған қолжетімді әдісті ұсынды. Бұл әдісте алдымен CrAl нанобөлшектері электрофоретикалық тұндыру (EPD-electrophoretic deposition) арқылы бетке енгізілді, нәтижесінде кеуекті қабат түзілді. Кейіннен осы қабаттың арасына Ni қабаты электрлік тұндыру әдісімен енгізілді. Нәтижесінде біртекті, тығыз және тотығуға төзімділігі жоғары NiCrAl нанокompозитті жабыны алынды. Бұл жабындар ауада 1000 °C температурада алюминий оксидті (Al_2O_3) қабатын түзе алды және тотығуға төзімділік жабын құрамындағы Cr және Al мөлшеріне байланысты жақсарған. Huijuan Zhen және т.б. ғалымдар тағы бір зерттеу мақаласында EPD және электрлік тұндыру әдістерін біріктіре отырып Ni-16Cr-14Al нанокompозитті жабындарын алған. Алдын ала жабынды 1000 °C құрғақ ауада тотықтырып жабын бетінде $\alpha-Al_2O_3$ алған. Кейіннен жабындарды 800 °C температурада 10 % H_2O , яғни ылғалды ауада тотығуға төзімділікке сынаған. Зерттеу нәтижесі бойынша жабын бетінде сыртқа $NiAl_2O_4$ және ішкі $\alpha-Al_2O_3$ екі қабатты оксидті қабаттар түзілген. NiCrAl жабыны болаттың ылғалды ауада тотығуға төзімділігін айтарлықтай арттырған.

Бұған себеп жабындарды алдын ала жоғары температурада тотықтырып, жабын бетіне $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ түзілуі екені мақалада жазылған [55].

Lei Yang және т.б. ғалымдар [56] NiCrAl композитті жабынының жоғары температуралық төзімділігін арттыру үшін Al бөлшектерін жабын бетіне электрофорез қоса тұндыру (EPCD - electrophores co-deposited) әдісін қолданған. Алынған жабын кейіннен вакуумдық термиялық өңдеуден (1000 °C, 2 сағат) өтті. Жабынға Al қосу оның тығыздығын арттырып, жабынның құрылымын біртекті етті. Сонымен қатар Al қосылуы тотығу мен Cr диффузиялануын басқара отырып, $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ қорғаныс қабатының түзілуін қамтамасыз еткен. Жалпы NiCrAl-Al композитті жабыны тотығуға және механикалық өзгерістерге төзімді болып келді. J. Khakzadian және т.б. [57] NiCrAl жабындарын катодтық-доғалық тұндыру (CAD) әдісімен де алып зерттеген. Зерттеу жұмысында осы әдіспен алған NiCrAl жабындарының микроқұрылымы мен фазалық құрамына субстрат температурасының (250-700 °C) әсері зерттелген. Зерттеу нәтижесінде төсеніш температурасының жабындардың құрылымы мен қасиеттеріне айтарлықтай әсер ететіні анықталды. Жоғары температура (700 °C) жабынның тығыздығын арттырып, кеуектілігі 4,4 %-дан 0,6 %-ға дейін төмендегені анықталды. Сонымен қатар, Cr атомдарының $\gamma\text{-Ni}$ фазасына диффузиясы жоғары температурада күшейіп, нәтижесінде $\alpha\text{-Cr}$ фазасы жоғалған.

NiCrAl жабындарын алу үшін қолданылатын тұндыру әдістерінің (PVD, EPD, ED, CAD) әрқайсысының өзіндік ерекшеліктері бар. CAD әдісі тығыз, адгезиялық беріктігі жоғары және біртекті жабын алуға мүмкіндік берді. Алайда бұл технология жалпы күрделі технологиялардың біріне жатады. EPD және ED технологияларының жабын алу процессінің салыстырмалы түрде қарапайымдылығы және арзан болуы, сонымен қатар күрделі пішіндегі бұйымдарға да жабын алуға мүмкіндік беріп, Cr мен Al нанобөлшектерін тиімді енгізуге болады. Алайда, жабынның біртектілігін қамтамасыз ету үшін қосымша термиялық өңдеу жұмыстарын талап етеді және нанобөлшектердің агрегациялану қаупі бар. Ал PVD әдісі арқылы алынған жабындардың сапасы жоғары, тегіс және өте тығыз болып келеді. Сонымен қатар фазалық және химиялық құрамды да дәл бақылауға мүмкіндік береді. Бірақ бұл әдіс тым қымбат және өнімділігі төмен. Сондай-ақ үлкен көлемді немесе күрделі пішінді бөлшектреге біртегіс жабын алу қиын. Сондықтан NiCrAl жабынын алуда оңтайлы технологияны анықтау әлі де маңызды.

NiCrAl негізіндегі жабындарды алудағы соңғы жылдары қарқынды дамып келе жатқан перспективалы бағыттарының бірі – термиялық бүрку технологиялары. Бұл әдістер әртүрлі пішінді және өлшемді бұйымдардың бетіне ыстық коррозияға және тотығуға төзімді жабындар алуға мүмкіндік береді. Термиялық бүрку барысында жабын бөлшектері балқытылып немесе жартылай балқытылып, үлкен жылдамдықпен төсеніш бетіне соқтығысады және қатая отырып тығыз жабын алынады. Әсіресе, жоғары жылдамдықты оттекті бүрку (HVOF- High-Velocity Oxy-Fuel), плазмалық бүрку, детонациялық бүрку әдістері NiCrAl негізіндегі жабындарын алу үшін кеңінен қолданылады. Термиялық бүркудің бұл әдістері адгезиялық беріктігі жоғары, тығыз және микроқұрылымы біркелкі біртекті жабындарды алуға мүмкіндік болады.

HVOF термиялық бүрку әдісімен алынған NiCrAl жабындары туралы біраз зерттеу жұмыстары бар. HVOF әдісімен алынған NiCrAl жабындары тығыздығының жоғарылығымен, құрылымының біртектілігімен және механикалық беріктігінің жоғарылығымен сипатталады. Mahesh R.A. және т.б. ғалымдар [58-61] HVOF әдісімен алынған NiCrAl жабындарының тас көмірмен жұмыс жасайтын қазандықтың төменгі температуралы қыздырғыш аймағында (шамамен 700 °C) ыстық коррозияға төзімділігін зерттеген. Зерттеу нәтижесінде NiCrAl жабыны тығыз, тұрақты оксид қабатын түзіп, ыстық коррозияға қарсы сенімді барьер қабылптастырған. Зерттеушілер NiCrAl жабындарын энергетикалық құрылғыларды ыстық коррозия мен тотығуға тосқауыл болу үшін қорғаныш жабын ретінде қолдануға ұсынған. Жоғары температурада жұмыс жасайтын қазандық болаттарының тотығу мен ыстық коррозияға төзімділігін бағалау үшін HVOF термиялық бүрку әдісімен алынған NiCrAl жабындары бойынша Ramesh M. R. және т.б. ғалымдар өз зерттеу мақалаларын ұсынды [62]. Зерттеу нәтижелері бойынша NiCrAl жабынының тотығу процессін баяулататын жабынның бетінде α -Al₂O₃ және Cr₂O₃ қорғаныс қабаттары түзілген. Ауадағы тотығу кезінде жабын бетінде тұрақты α -Al₂O₃ және Cr₂O₃ қабаттары түзіледі, бұл баяу және тұрақты тотығу кинетикасын қамтамасыз етеді. Na₂SO₄-V₂O₅ ортадағы ыстық коррозия кезінде жабын бетінде метастабильді Al₂O₃ қабаты түзіледі, бұл балқыған тұздың коррозиясына төтеп берген.

Ramandhany S және т.б. [63] ғалымдар өз зерттеулерінде HVOF термиялық бүрку әдісімен алынған NiCrAl жабынның жоғары температуралық тотығуға төзімділігін және механикалық қасиеттерін жақсарту мүмкіндігін бағалау үшін кремнийді (Si) реактивті элемент ретінде қосты. Зерттеу нәтижелері кремний қосу NiCrAl жабындарының жоғары температуралық тотығуға төзімділігін едәуір жақсартқанын көрсетті. Зерттеушілер кремнийдің болуы арқылы жабын бетінде α -Al₂O₃ қорғаныс қабатының үздіксіз түзілуін қамтамасыз еткен деп тұжырымдады. Сонымен қатар, кремнийдің реактивті элемент ретінде қосылуы жабынның микроқаттылығын да арттырған. NiCrAl жабындарына 2,7 % кремний қосу олардың балқытылған нитрат тұздарындағы коррозияға төзімділігін айтарлықтай арттырады. Кремний қосылған жабындарда тұрақты натрий алюмосиликат қабаты қалыптасып (Na_{1.75}Al_{1.75}Si_{0.25}O₄), балқыған тұздың енуін және Cr мен Al тотығуын тежейді. Кремний қосылған NiCrAl жабынын күн энергия жүйелеріндегі (CSP- Concentrated Solar Power) жылу алмасу құрылғыларын қорғау үшін перспективалы жабын ретінде ұсынған [64].

Daniel Aristu және т.б. ғалымдар [65] ауа плазмалық бүрку (APS-Atmospheric Plasma Spraying) және HVOF сияқты термиялық бүрку әдістерімен алынған NiCrAl жабынының жоғары температуралық коррозияға төзімділігі кешенді түрде зерттелген. Бұл жабындарды күн энергия жүйелеріне қолдану ұсынылып, оларды 650 °C температурадағы балқыған карбонат тұздар қоспасында сынаған. Зерттеу нәтижесінде NiCrAl жабындары күн энергия жүйелеріндегі балқыған тұздарға төзімді болуы үшін қолдануға болады, алайда олардың қолдану мерзімінің ұзақтылығы кеуектілігінің жоғары болуы мен қорғаныс қабаттарының тұрақсыздығына байланысты қысқа екені анықталды. Сондықтан

осы кемшіліктерді жою үшін кеуектілігі төмен жабындар алуға мүмкіндік беретін әдістерді қолдану ұсынылған.

Ауа плазмалық бүрку әдісімен екі қабатты NiCr және Al жабынын фосильді отынмен жұмыс жасайтын энергетикалық қондырғылардың тиімділігін арттыру үшін қосымша қорғаныш ретінде алу мақсатында зерттелді [66]. Жұмыстың негізгі идеясы NiCr-Al қабатының кеуектерін Al толтырып, энергетикалық қондырғыдағы бу тотығуынан қосымша қорғау. Бу тотығуына ұшыраған үлгілер Ni және Cr элементтерінің Al жабын құрылымына диффузияланған нәтижесінде үстіңгі қабат Ni-Al интерметаллидтік қосылысына айналады. Зерттеу нәтижесі бойынша жабын бетінде NiAl және Al_2O_3 фазаларының түзілуі жоғары температурада жұмыс жасайтын энергетикалық қондырғылардың жұмыс жасау мерзімін ұзартады. Зерттеу жұмысында екі қабатты жабын 750 °C температурада 3000 сағат сынақтан кейін де жабын болатты тиімді қорғаған.

Ауа плазмалық бүрку әдісімен алынған NiCrAl жабындарының жылжу деформациясына төзімділігіне (creep resistance) әсері зерттелді. Эксперименттік нәтижелер бұл жабындардың субстраттың тез жылжу деформациясына төзімділігін жақсартатынын көрсетті [67]. Byung-Young Choi және т.б. ғалымдар [68] ауа плазмалық бүрку әдісімен титан қорытпасы бетіне алынған NiCrAl жабынының микроқұрылымы мен жоғары температураға төзімділігі арасындағы байланысын басқа жабындармен салыстырмалы түрде зерттеген. Зерттеу нәтижелері титан қорытпасы үшін NiCrAl жабынның ыстыққа төзімділігін салыстырмалы түрде төмен екені айқындалды. Selman Aydin және тағы басқалар [69] ауа плазмалық бүрку әдісімен алынған ЖОЖ үшін NiCrAl жабынын аралық жабын ретінде поршень мен клапандарға алып, жабынның дизель қозғалтқышының өнімділігіне, жану сипаттамалары мен зиянды газдардың жабынға әсері зерттелген. Зерттеу нәтижесі жабын оқшауланған жану камерасының жылуөтімділігін азайтып, қозғалтқыштың ПӘК жоғарлауына тиімді екенін анықтады.

Ауа плазмалық бүрку әдісімен алынған NiCrAl жабындарын мысты құю процессінде қолданылатын графит формаларына қорғаныш жабын ретінде қолдану бағытында зерттеу жұмыстары жүргізілген [70]. Зерттеу барысында бірнеше жабындар салыстырылып (Mo, NiAl, NiCrAl, Cr_3C_2 -NiCr, WC-CrC-Ni), арасында NiCrAl жабынының сұйықтың шекаралық жанасу бұрышы (contact angle) төмен, яғни сулану қабілеті аз екені анықталды. Алайда ауа плазмалық әдіспен барлық жабындар кеуектіліктің жоғарғы мәніне байланысты төмен жылуөткізгіштікті көрсетті. Сондықтан да жұмыста жабынның кеуектілігін азайту бағытында жұмыстар жасалу керектігі аталып өткен.

NiCrAl жабынын салмағы жеңіл, беріктігі жоғары, бірақ тозу мен коррозияға төзімділігі төмен магний қорытпаларының бетіне ауа плазмалық және суық бүрку (Cold spraying) технологияларымен алынып, салыстырмалы зерттеу жұмыстары жүргізілді [31]. Зерттеу нәтижелері ауа плазмалық бүрку әдіспен алынған NiCrAl жабындардың кеуектілігі 3,21 %, ал суық бүрку әдісімен алынған NiCrAl жабынының кеуектілігі небәрі 0,68 % екенін көрсетті. Суық бүріку әдісімен алынған NiCrAl жабынының қаттылығы ($650\text{ HV}_{0,1}$) плазмалық бүріку әдісімен алынған NiCrAl жабындарының қаттылығынан жоғары болды

(300-400 HV_{0,1}). Тозуға төзімділік сынағында суық бүрку әдісімен алынған NiCrAl жабыны үйкеліс коэффициентінің төмендігін (0,346), тозу көлемінің төмендеуін (3,026 мм³) және сәйкесінше плазмалық бүрку әдісімен алынған NiCrAl жабындарымен салыстырғанда тозуға төзімділігінің жоғары екенін көрсетті. Электрохимиялық сынақта суық бүрку әдісімен алынған NiCrAl жабынының ($4,404 \times 10^{-2} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$) коррозия тоғының тығыздығы плазмалық бүрку әдісімен алынған жабындармен салыстырып ($25,96 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$) қарағанда әлдеқайда төмен болды, бұл суық бүрку әдісімен алынған NiCrAl жабынының коррозияға төзімділігі жоғары екенін көрсетеді. Осылайша суық бүрку әдісі магний қорытпаларының бетіне NiCrAl жабынын алудың тиімді әдісі ретінде ұсынылды. Celik E. және тағы басқалардың зерттеуінде де ауа плазмалық бүрку әдісімен алынған NiCrAl жабынының коррозияға төзімділігі орташа деп бағаланған [71].

Ғалымдар ауа плазмалық бүрку әдісімен алынған NiCrAl жабынын қайтадан қуаттылығы 5кВт CO₂ лазер көмегімен балқытып, қайта қатайту арқылы өңдеп жақсартты [29]. Лазермен өңделген кезде жабын бетінде біркелкі балқыған қалыңдығы 0,3-0,4 мм болатын Ni бай аморфты құрылымдар және Ni₃Al кристалиитті қабат түзілген. Аморфты құрылым мөлшері 2,18 %-дан 31, %-ға дейін артқанда, жабынның тозуы шамамен 3,6 есеге азайғаны анықталған.

NiCrAl жабыны тот баспайтын төсеніш пен термохромды жабындар (TSC-Thermochromic Coating) арасында байланыстырушы жабын ретінде плазмалық бүрку әдісімен алынған [72]. Бұған себеп, термохромды жабындарды тікелей бүрку кезінде жабын мен субстрат арасындағы жылулық кеңею коэффициентінің сәйкессіздігінен жабын қабыршақтанып кетуі мүмкін. Ал NiCrAl жабынын байланыстырушы жабын ретінде қолданғанда ол қалдық кернеулерді төмендетіп, жабынның адгезиялық беріктігін жоғарылатады. Жалпы NiCrAl жабынын байланыстырушы жабын ретінде қолданылып алынған термохромды жабындар ғарыш аппараттарының жылу реттеу жүйелерінде қолдануға перспективалы болып саналады. Себебі, мұндай жабындар қосымша жылытқыштар мен салқындатқыштарға деген қажеттілікті азайтады. Таумаз және тағы басқалар [73] CaZrO₃ және MgZrO₃ керамикалық жабындарына NiCrAl байланыс қабаты негізінде қолданды және тиімділіктің максималды 5 %-ға артқанын анықтады. NiCrAl байланыс қабаты бар ЖОЖ және алюминий-титан оксиді немесе иттриймен тұрақтандырылған ZrO₂ дизельді қозғалтқыштың поршеніне қолданылып, меншікті отын шығынын 15-20 %-ға төмендетуге мүмкіндік береді және жоғары қозғалтқыш жылдамдығында өнімділіктің 8 %-ға айтарлықтай артқанын көрсетті [74].

Термиялық бүрку әдістерінің бірі электр доғалық бүрку (Electric arc spraying) әдісімен NiCr және NiCr/Al қосарланған қабатты жабыны алынды [75]. Мақалада осы жабындардың 800 °C температурада тотығуға төзімділік қасиеттері зерттелген. Тотығудан кейін алюминий NiCr қабатына диффузияланып жаңа Al₃Ni₂ және Al₂O₃ фазалары түзуіне байланысты, NiCr/Al жабыны NiCr жабынымен салыстырғанда тотығуға төзімділігі жоғары екені анықталды.

NiCrAl жабынының тозуға төзімділігі мен ұзақ мерзімде қызмет етуін арттыру үшін жабын жоғары жылдамдықты металдандыру әдісімен алынып,

қосымша термиялық өңдеу жүргізу ұсынылды [76]. Жұмыста NiCrAl жабынының термиялық өңдеуден кейінгі құрылымдық-фазалық өзгерістері мен трибологиялық қасиеттерінің жақсаруы толық сипатталған. Жабындарға 550-600 °C температурда қысқа мерзімді өңдеу (20-40 минут) онтайлы деп таңдалған, себебі бұл режимдер де жабын максималды беріктік пен минималды кеуектілікке ие болған. Зерттеу нәтижелері термиялық өңдеу кезінде композициялық жабын бөлшектерінің диффузиялық өзара әрекеттесуі нәтижесінде Al_3Ni , Al_3Ni_2 , $AlNi$, $AlNi_3$ интерметаллидтік қосылыстарының бір уақытта түзілуі орын алатынын көрсетті, бұл жабынның микротұтқырлығы мен қаттылығын бастапқы күйімен салыстырғанда шамамен 2,1 және 1,5 есеге дейін арттырды деген қортынды жасалған.

Chen және тағы басқа ғалымдар [77] жоғары энергиялы микро-доғалық легирлеу (HEMMA - High-Energy Micro-Arc Metallurgical Alloying) әдісі арқылы алынған NiCrAl жабындарының құрылымы мен қасиеттерін зерттеді. Нәтижесінде төсеніш бетінде тығыз, жарықшақсыз және адгезиялық беріктігі жоғары NiCrAl жабыны алынды. Жабын бетінде түзілген γ -Ni және β -NiAl фазалары жабынның тотығуға төзімді болуына әсер еткен. HEMMA әдісімен алынған NiCrAl жабынын газ турбиналары, авиациялық және энергетикалық құрылғылардың жоғары температуралық аймақтарына алу ұсынылған.

NiCrAl жабындарын лазерлік қаптау (LC- Laser Cladding) және лазерлік қайта балқыту (LR- Laser Remelting) әдістері арқылы алып, олардың механикалық, электрохимиялық және пассивті қорғаныш қасиеттері зерттелді [78]. Жұмыстың негізгі мақсаты жабынның коррозияға төзімділігін арттыру бағытында LR әдісі арқылы жабынның кеуектілігін төмендету, тығыздығы мен құрылымдық беріктігін жақсарту. Зерттеу нәтижесінде жабын бетінде негізгі фазалар ретінде Cr_2Ni_3 , Ni_3Fe және оксидтер түзілген. Жабынның қалдық кернеулері 72 МПа (созушы) және 10 МПа (сығушы) коррозияға төзімділікке оң әсер еткен. Тұзды ерітіндіде (3,5% NaCl) LR NiCrAl жабынның коррозиядан қорғау тиімділігі 96,93 %, қышқылды ортада 77,50 % және сілтілі ортада 74,12 % нәтижелерін көрсеткен. LR әдісімен алынған NiCrAl жабынын теңіз, өнеркәсіптік және құрылыс конструкцияларын ұзақ мерзімді коррозиядан қорғау үшін перпетивті деп көрсеткен. LC әдісімен алынған NiCrAl жабындарының тотығуға төзімділігіне тантал (Ta) элементінің әсерін зерттеу жұмыстарын Ting Yu әріптестерімен бірге жүргізілген [79]. Алынған нәтижелер бойынша Ta қосылған жабындар (4,23 масс.% дейін) таза NiCrAl жабындарына қарағанда тотығуға төзімділігі артуына Cr_2O_3 , $CrTaO_4$ және Al_2O_3 фазалары себеп болған. Алайда Ta жоғары температурада оксидтер арасында таралуы бұл қабаттардың жарықшақтануына себеп болған, әсіресе жабындардағы оксидті қабаттардың қабыршақтануы 1050 °C температурада 200 сағаттан кейін күшейген.

NiCrAl жабынын авиақозғалтқыштардың турбина қалақшаларының сыртқы бетіне тотығу мен коррозиядан қорғау үшін қолдануға болады [80]. Әдетте турбина қалақшаларының ұшы өте жоғары температураға (1087 °C) үйкеліп тозуға ұшырайды. Осы үйкеліс салдарынан NiCrAl жабынының бүлініп, жабынсыз метал беті ыстық коррозия мен тотығуға ұшырап, жарылады. Осы себептерге байланысты NiCrAl жабынының тотығу мен тозуға төзімділік

қасиеттерін арттыру бойынша зерттеу жұмыстары көптеп жүргізіледі. Е. Вууккаау және оның әріптестері [81] дизельді қозғалтқыштарға арналған ЖОЖ бойынша шолу негізіндегі еңбегінде NiCrAl аралық байланыстырушы жабын ретінде қолдануды ұсынады. Бұл жабынның негізгі міндеті төсеніш пен үстіңгі керамикалық жабын арасындағы жылулық ұлғаю коэффициенттерінің айырмашылығын біршама теңесітіріп, жабынның тұрақтылығы мен адгезиялық беріктігін арттырады. Аталған жұмыста сондай-ақ NiCrAl аралық байланыстырушы қабатын арзаны және қолжетімді FeCrAlY байланыстырушы жабынына алмастыруға болатыны айтылған.

Қорытындылай айтқанда NiCrAl негізіндегі жабындар жоғарғы температураға төзімді кең тараған қорғаныш жабыны болып табылады. Жоғарғы температураға төзімділік жабын құрамында Cr және Al элементтерінің жеткілікті болуына байланысты қорғаныс қабілеті жоғары оксидтердің түзілуімен (Al_2O_3 және Cr_2O_3) түсіндіріледі. Сонымен қатар, NiCrAl негізіндегі жабындарын ЖОЖ-дың адгезиялық беріктігін арттыру мақсатында қолданылатын аралық қабат ретінде қолдану кең тараған. Қазіргі таңда NiCrAl негізіндегі жабындарды алудың әдіс-тәсілдерін жетілдіру авиация мен жылу энергетика турбиналарына арналған жабынның кеуектілігін (porosity) төмендетуге бағытталған, себебі ол жабынның жылу оқшаулағыш қасиетін сақтай отырып термоциклді тотығу мен эрозиялық тозуға төзімділігін арттырады. Соңғы жиырма жылда ғалымдар NiCrAl негізіндегі жабындарды алудың әртүрлі әдіс-тәсілдерін дамыта отырып, жабынның құрылымдық ерекшеліктерін зерттеу бойынша көптеген жұмыстар жасады [82]. Градиентті құрылымдағы жабындар алу тәсілі өте перспективалы бағыттардың бірі ретінде қарастырылуда [83-85]. Бұл тәсіл жабынның механикалық және термиялық тұрақтылығын арттырып, қызмет ету мерзімін ұзартуға мүмкіндік береді. Сонымен қатар, градиентті құрылым алу арқылы NiCrAl жабындарының тотығу тұрақтылығы мен адгезиялық беріктігін жақсартуға болады.

1.3 Градиентті құрылымды Ni-Cr-Al қорғаныш қабаттарын алудың негіздемесі

Функционалды градиентті жабын (FGC - Functional Gradient Coating) – бұл қалыңдығы бойынша құрамы немесе құрылымы біртіндеп өзгередіін көпқабатты жабын түрі. Мұндай жабындардың қасиеттері (механикалық, физикалық, термиялық және т.б.) қабаттан қабатқа ауысқанда біртіндеп өзгереді. Функционалды градиентті жабын (ФГЖ) алу әдіс-тәсілдері соңғы жиырма жылда қатты дамып жатқан заманауи бағыттардың бірі [86–88]. NiCrAl негізіндегі ФГЖ заманауи газ турбиналы қозғалтқыштардың маңызды компоненттерінің (мысалы, қалақшалар, жану камералары және т.б.) механикалық беріктігін, тотығуға мен коррозияға төзімділік қасиеттерін жақсартады [89–92].

Жоғары температуралық және механикалық қасиеттерін арттыру мақсатында NiCrAl градиентті жабындары әр түрлі әдістермен алынып зерттелді. J.Q. Li және т.б. ғалымдар [93] реакциялық ыстық престеу (RHP - reactive hot pressing) әдісі арқылы NiCrAl жабынын аралық байланыс жабыны

ретінде NiCrAl-Al₂O₃-YSZ негізіндегі градиентті құрылымды ЖОЖ қолданды. 1000 °C температурада термиялық сынақтан кейін NiCrAl-Al₂O₃-YSZ градиентті жабынында ешқандай жарықшақтар байқалмаған, яғни NiCrAl аралық қабаты термиялық кеңею коэффициентін біртіндеп өзгертіп, жабындағы ішкі кернеуді азайтады.

Соңғы кездері NiCrAl жоғары температуралы ФГЖ термиялық бүрку әдістерімен алу бағытындағы зерттеулер көп кездеседі [89, 91]. Chunxi Pan және т.б. ғалымдар [94] плазмалық бүрку әдісімен алынған ZrO₂/NiCrAl функционалды градиентті ЖОЖ микроқұрылымын кешенді зерттеді. Зерттеу нәтижесінде жабынның беріктік қасиетінің артуы градиентті қабатының микроқұрылымының жақсаруымен түсіндірді. Алайда термиялық сынақ кезінде ZrO₂/NiCrAl ФГЖ арасында қалыптасқан Al₂O₃ и Cr₂O₃ оксидті қосылыстары жабын құрылымында жарықшақтардың пайда боуына әсер еткен. Текмен С. және оның әріптестері [95-96] плазмалық бүрку әдісімен алынған NiCrAl/MgZrO₃ негізіндегі функционалды градиентті жабынды жылулық циклдік төзімділігін сынағанда жабында жарықшақтар мен қабыршақтар пайда болуын жабын құрамында жартылай балқыған бөлшектер мен кеуектіліктің жоғары болғанымен байланыстырады. Сондықтан олар бұл кемшіліктерді жою үшін плазмалық бүрку технологиясының параметрлерін ескере отырып NiCrAl/MgZrO₃ негізіндегі ФГЖ алуға микрондық өлшемдегі (35-90 мкм) гомогенді ұнтақтарды дайындаудың химиялық синтез әдісін ұсынды [97]. Жалпы, ауа плазмалық бүрку әдісімен кеуектілігі төмен, ұнтақтар біркелкі балқыған NiCrAl градиентті жабындарын алу бойынша ары қарай зерттеу жұмыстары жүргізілуі керек.

Термиялық бүрку әдістерінің бірі HVOF технологиясымен TiAl-Nb/NiCrAl негізіндегі екі қабатты, үш қабатты және градиентті жабындарда NiCrAl байланыстырушы аралық жабын ретінде зерттелді [98]. Зерттеу нәтижесінде екі және үш қабатты жабындармен салыстырған да градиентті жабынның кеуектілігі салыстырмалы түрде төмен (0,87 %) екені анықталды. Басқа жабын түрлерімен салыстырған да градиентті жабынның адгезиялық беріктігі жоғары (73,9 МПа) болуы градиенттік құрылымда ішкі кернеудің шоғырлануының төмен деңгейімен түсіндіріледі. Сонымен қатар, TiAl-Nb/NiCrAl градиентті жабынының термиялық төзімділігі беттік кернеудің біртіндеп тарауына байланысты екі және үш қабатты болып алынған жабындармен салыстырғанда жоғары нәтиже (142,9 %) көрсеткен. Жалпы HVOF технологиясымен алынған градиентті құрылымдағы TiAl-Nb/NiCrAl жабыны бөлшектердің механикалық, жылулық және коррозиялық тұрақтылығын жақсартқан.

Термиялық бүрку технологияларының ішінде аса жоғары жылдамдықпен, тығыз, кеуектілігі төмен және адгезиялық беріктігі жоғары жабындарды алуға мүмкіндік беретін детонациялық бүрку әдісін ЖОЖ алу үшін қолдану мүмкіншіліктерін зерттеу өте маңызды [99-101]. Vassilis Stathopoulos және оның әріптестері [102] детонациялық бүрку әдісін газ турбиналары үшін функциялық градиентті көпқабатты ЖОЖ алу үшін қолданды, яғни жабынның YSZ керамикалық және аралық қабаты детонациялық әдіспен алынып, беткі қабатына шликерлік құю әдісімен (SC - slip casting) нанокөмпозитті оксидті жабын

алынды. Детонациялық ЖОЖ 1200 °С жылулық төзімділігін зерттеу нәтижесінде жабынның барлық қабаттары арасында жақсы адгезиялық беріктік және үйлесімділік сақталып, жабын қабаттарының қабыршақтануы мен жарықшақтануы байқалмады.

Детонациялық бүрку әдісі үлкен перспективаларға ие, себебі бұл әдіс технологиялық параметрлерді өзгерту арқылы бүркілетін ұнтақ пен жабынның температурасын кең ауқымда басқаруға мүмкіндік береді [103–105]. Бұл жабын материалының құрылымдық-фазалық күйін бақылауға және қажетті қасиеттері бар жабындарды алуға жағдай жасайды. Осы артықшылықтар детонациялық бүрку әдісімен жоғары температураға төзімді NiCrAl градиентті жабындарды алуға мүмкіндік береді.

Бөлім бойынша қорытынды және зерттеу міндеттерін қою

Ғылыми еңбектерге шолу нәтижесі бойынша келесі тұжырымдамалар жасалды:

- Ni-Cr-Al жүйесі жылу оқшаулағыш жабындар үшін аралық қабат ретінде қолданылады. Бұл қабаттың негізгі міндеті төсеніш (метал, болат) пен керамикалық жабын арасындағы жылулық ұлғаю коэффициенттерінің айырмашылығын біршама теңестіріп, жабынның тұрақтылығы мен адгезиялық беріктігін арттырады;

- никель негізді Ni-Cr-Al композициялық қаптаманың құрамында Al және Cr элементтерінің мөлшерін реттей отырып қорғаныс оксид қабатын (Al_2O_3 немесе Cr_2O_3) қалыптастыру арқылы жабынның ыстыққа төзімділігін арттыруға болады;

- көпқабатты құрылымды қаптамалармен салыстырғанда градиентті құрылымды жабындардың кеуектілігі салыстырмалы түрде төмен және адгезиялық беріктігі жоғары болады. Себебі градиенттік құрылымда ішкі кернеудің шоғырлану деңгейі төмен;

- ыстыққа төзімді жабындарды (heat resistance coatings) алуға арналған технологиялар қаптаманың төмен кеуектілігін қамтамасыз ету керек. Төмен кеуектілік ыстыққа төзімді жабындардың жылуөткізгіштік қасиеттерін арттырады;

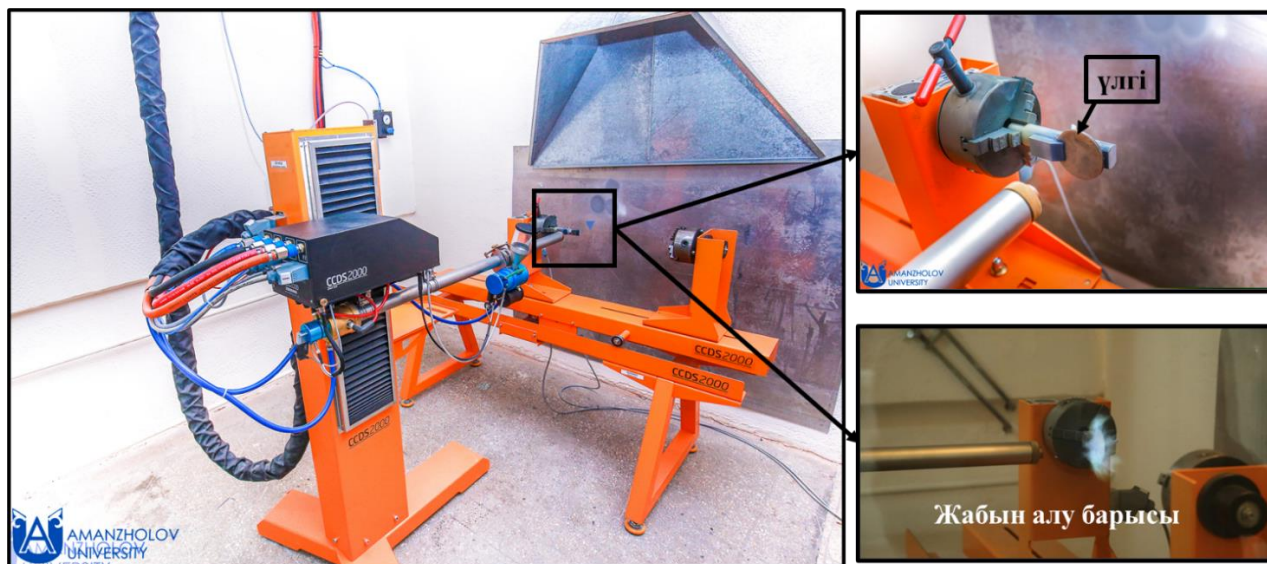
- Ni-Cr-Al қаптамасын алу үшін газтермиялық әдістері бойынша ауа плазмалық бүрку (APS) және жоғары жылдамдықты оттекті бүрку (HVOF) әдістері көп зерттелген. Алайда детонациялық бүрку технологиясын қолдану арқылы алынған Ni-Cr-Al жабынын зерттеу жұмыстары аз.

Ғылыми еңбектерге шолу бойынша тұжырымдамаларды ескере отырып диссертацияда аралық қаптама ретінде көп қолданылатын Ni-Cr-Al жабынын ыстыққа төзімді қаптама ретінде қолдану мүмкіндіктерін толық зерттеу мақсаты қойылды. Жоғары сапалы Ni-Cr-Al негізіндегі ыстыққа төзімді жабын алу үшін детонациялық бүрку әдісінің оқтайлы технологиялық параметрлерін анықтап, қаптаманың қалыптасу заңдылықтарын зерттеу міндеті жоспарланды. Сонымен қатар, жоғары температурада жұмыс істейтін қондырғылар үшін қолданатын жабындардың жүйесі қарапайым және жабынды алу тәсілдері тиімді болу қажет.

2 ТӘЖІРБИЕЛІК ҚҰРАЛДАР, МАТЕРИАЛДАР ЖӘНЕ ЗЕРТТЕУ ӘДІСТЕРІ

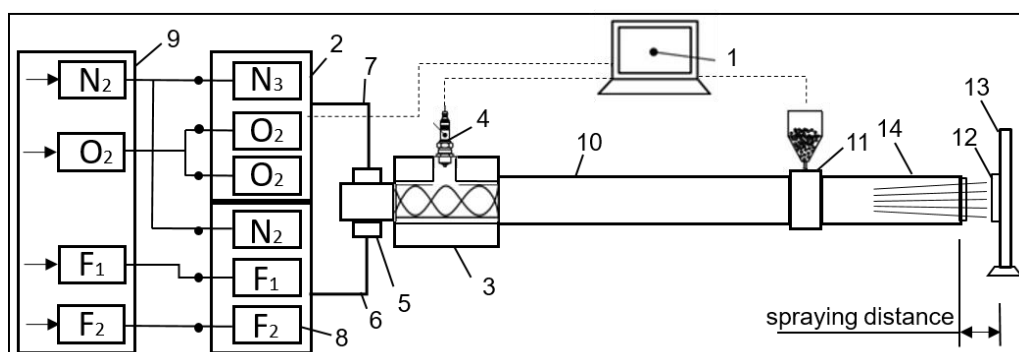
2.1 Компьютерленген CCDS2000 детонациялық бүрку кешені

Ni-Cr-Al жабыны Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университетінің «Беттік инженерия және трибология» ғылыми-зерттеу орталығында орналасқан CCDS2000 (Computer Controlled Detonation Spraying) компьютерлендірілген детонациялық бүрку кешенінде алынды (2.1-сурет).



Сурет 2.1 – CCDS2000 детонациялық бүрку кешені

CCDS2000 детонациялық бүрку кешенімен жабын алу сызбанұсқасы 2.2-суретте көрсетілген. Детонациялық бүрку процессі келесі ретпен жүзеге асады [106]: жанғыш газдар (ацетилен, оттегі және инертті газдар) клапан блогы (9; 2) арқылы жану камерасына (3) беріліп араласады; тұтандырғыш құрылғының (4) көмегімен жану камерасындағы газ қоспасы тұтанады, нәтижесінде детонациялық толқын пайда болып, ол жоғары жылдамдықта оқпанға (14) таралады; бір мезетте дозатордан (11) ұнтақ оқпан (10) кеңістігіне қысыммен түседі; детонациялық жарылыс кезінде ұнтақ бөлшектері балқып, соққы толқыны әсерінен жоғары жылдамдыққа ие болып төсеніш (12) бетіне бағытталып, жабын қабаты қалыптасады. Детонациялық бүрку процессі басқару блогы (1) арқылы іске асып, бүрку кезінде үлгінің қозғалысын 3D манипуляторымен (13) реттеледі. Детонациялық бүрку процессінің энергиясын анықтайтын негізгі факторлар: жану камерасын отын газымен толтыру деңгейі; жарылғыш газдар мен оттегі көлемінің арақатынасы, яғни арнайы клапандар арқылы детонация өнімдерінің ұнтақ бөлшектеріне жылулық және химиялық әсер ету деңгейін реттеуге болады. Детонация процесінде ұнтақ бөлшектері шамамен 1000 м/с дейінгі жоғары жылдамдыққа дейін үдетіліп, шамамен 3500-4000 °C температурада балқып, төсеніш (substrate) бетіне жабын болып қалыптасады [104-105].



1- басқару компьютері; 2 – газ таратқыш , 3 – араластыру-тұтану камерасы, 4 - тұтандырғыш, 5 – қабылдағыш клапан, 6 – отын желісі, 7 - оттегі желісі, 8 – газ клапандары, 9 – газ беру блогы, 10 – оқпанның ұңғыма бөлігі, 11 – ұнтақ диспенсері, 12 - өңделетін бөлік; 13- манипулятор, 14 – оқпанның ауыз бөлігі

Сурет 2.2 – CCDS2000 детонациялық кешенінің жабын алу процесі сұлбасы

Ni-Cr-Al жабынын алу үшін жарылғыш газ ретінде оттегі-ацетилен (O_2/C_2H_2) қоспасы қолданылды, ол детонациялық бүрку әдісімен ұнтақ материалдарын жағу кезінде ең кең таралған отын болып табылады. O_2/C_2H_2 жарылғыш қоспасының құрамы мен қатынасына байланысты композициялық бөлшектердің жекелеген фазалары арасында химиялық өзара әрекеттесулер орын алуы мүмкін [107]. Бүрку процесі жарылғыш газдар қоспасының қатынасы $O_2/C_2H_2 = 1,856$ мәнінде жүргізілді. Азот тасымалдаушы газ ретінде қолданылды. Төсеніш пен детонациялық оқпан арасындағы қашықтық 150 мм. Бұл қашықтық бөлшектердің бетке соғылу энергиясын оңтайлы деңгейде ұстап тұруға мүмкіндік береді, нәтижесінде адгезиялық беріктігі жоғары жабын қалыптасады. Оқпанның диаметрі – 20 мм. Диаметр мөлшері бүркілетін бөлшектердің ағынын реттеп, олардың таралу біркелкілігін қамтамасыз етеді. Ni-Cr-Al жабындарын алу үшін қолданылған технологиялық параметрлер 2.1-кестеде көрсетілген.

Кесте 2.1 – Ni-Cr-Al жабындарын алу үшін қолданылған детонациялық бүрку процесінің технологиялық параметрлері

№	O ₂ /C ₂ H ₂	Оқпанды жарылғыш газбен толтыру көлемі, %	Бұрку қашықтығы, мм	Ату саны
1	1,856	25	150	40
2	1,856	30		
3	1,856	40		
4	1,856	50		

2.3-суретте Ni-Cr-Al жабынын алудың циклограммасы бейнеленген, онда оқпанның 50% жарылғыш газбен толтыру жағдайындағы процестің негізгі кезеңдері көрсетілген.

Клапана	Парам.	Циклограмма в технологии (номер 1)			
1-Ствол	Инверс.	100----125			
2-Ацетилен	2.0	3-----65			
3-Пропан	1.7	3-----50			
4-Кислород	1.8	3-----65			
5-Кислород	2.1	3-----64			
6-Азот	2.2		90-----199		
7-Азот	2.0		90-----199		
8-Дозатор1	2.4/2.0	50-----100			
9-Дозатор2					
Искра	*****		115		
		1----- Длительность циклограммы -----200			
0.К.					
КЧС (L/D) 650/26 мм		Объем ствола, см^3	491	Заполнение	50 %
ДЧС (L/D) 400/20 мм		Объем демпфера, см^3	25	Продувка	41 %
Заполнение до дозатора		74 %		0/С	1.026
distance 150mm, PF shuttle the biggest one, powder Durmat 603.001 (AL203 22-45 m km)					

Сурет 2.3 – Оқпанды жарылғыш газбен 50 % толтырып Ni-Cr-Al жабынынын алу циклограммасы

2.2 Төсеніш 12Х1МФ болатының құрамы мен сипаттамалары

Ni-Cr-Al жабындарын алу үшін 12Х1МФ болаты таңдалып алынды. 12Х1МФ болаты жоғары температуралық жұмыс жағдайларына төзімділігімен ерекшеленеді. 12Х1МФ болаты жоғары температуралық ортада жұмыс істейтін жылу электр станцияларының қазандық құбырларын, турбина роторлары мен дискілерін, жылу алмастырғыштар элементтерін жасауда кеңінен қолданылады. 12Х1МФ болаты төменлегірілген болаттар қатарына жатады. Негізгі легірілеуші элементтер ретінде хром (Cr), молибден (Mo) және ванадий (V) кіреді, олар материалдың жоғары температуралық беріктілігі мен коррозияға төзімділігін қамтамасыз етеді. 2.2 және 2.3-кестелерінде 12Х1МФ болатының химиялық құрамы мен негізгі механикалық сипаттамалары көрсетілген.

Кесте 2.2 – 12Х1МФ болатының химиялық құрамы, % (МЕМСТ 8559 - 75)

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Mo	V	Cu
0.1 - 0.15	0.17 - 0.37	0.4 - 0.7	< 0.3	< 0.025	< 0.03	0.9- 1.2	0.25- 0.35	0.15- 0.3	< 0.2

Кесте 2.3 – 12Х1МФ болатының механикалық сипаттамалары

Механикалық сипаттамалар	шамасы
Созылу беріктігі (σ_B), МПа	490-590
Аққыштық шегі (σ_T), МПа	280-390
Салыстырмалы ұзаруы (δ), %	20-24
Жұмыс температурасы, °С	500-600
Тұтқырлық (КСУ, 20°С), Дж/см ²	78
Қаттылық (НВ), термиялық өңдеуден кейін	170-220

Төсеніш дайындау үшін 12Х1МФ болаты диаметрі 50 мм, қалыңдығы 3 мм өлшемде және 15х15х3 мм текше түрінде кесіліп дайындалды. Жабын алудан бұрын төсеніштің беті түйіршіктері 120-2000 дейінгі құмқағаздарды қолдана отырып тегістелді. Үлгілердің беттік орташа кедір-бұдырлығы $Ra \approx 0,7$ мкм төмен болды. Жабынның адгезиялық беріктігін жақсарту үшін төсеніш үлгілерінің беті құм ағындарымен өңделді. Ал жабындардың микроқұрылымын зерттеу үшін үлгілер механикалық тегістеу мен механикалық жылтыратуды қамтитын стандартты әдіс бойынша дайындалды. 12Х1МФ болат үлгілерін жылтырату арнайы сүлгіге жағылған алмаз пасталарында жүргізілді, оның түйіршіктері біртіндеп азайтылды.

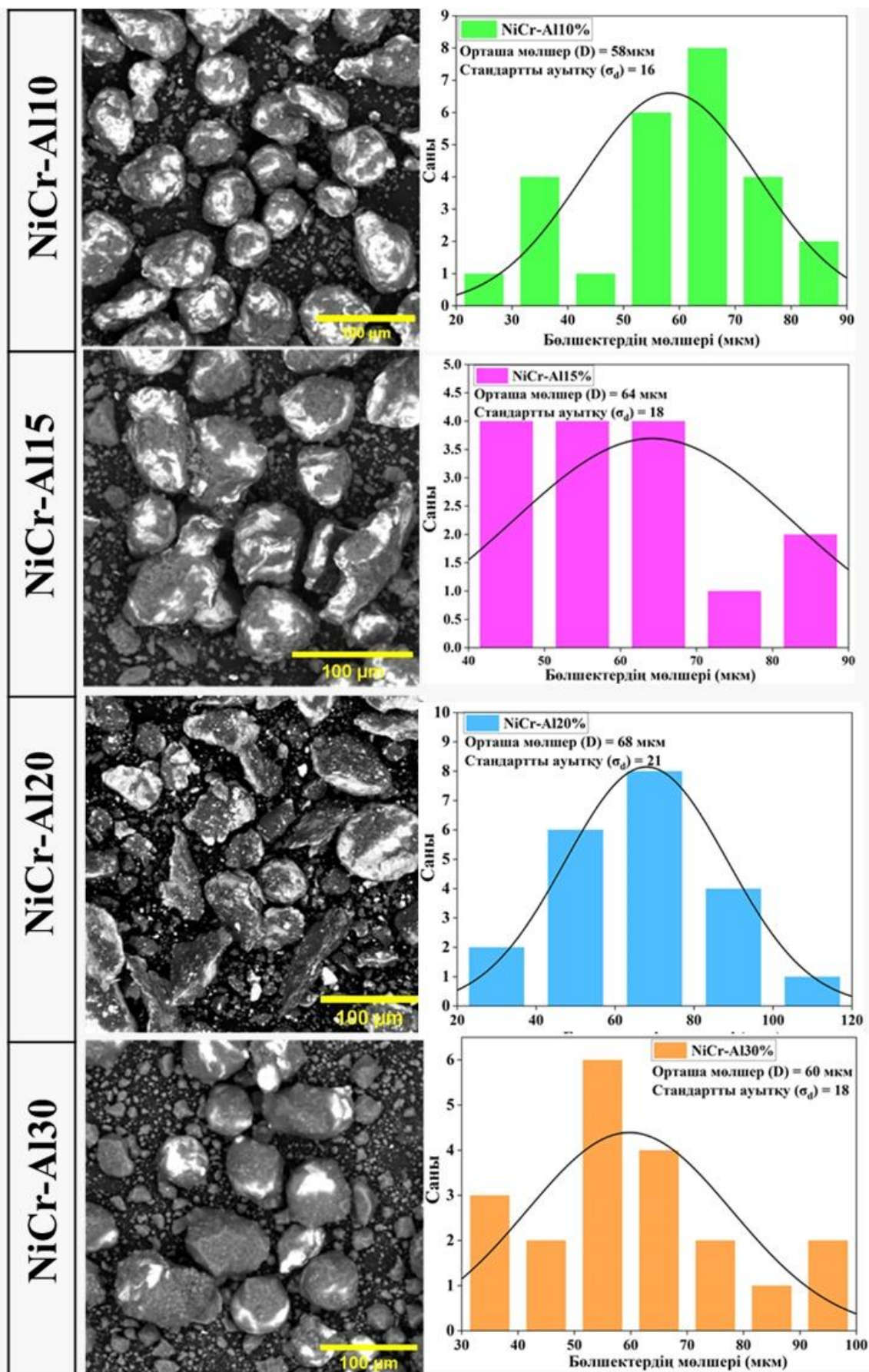
2.3 Ni-Cr-Al композитті ұнтағын әзірлеу және олардың морфологиялық-өлшемдік сипаттамалары

Композитті ұнтақтарды дайындау үшін Ni75Cr25 ұнтағы және Al (тазалығы 99,99 %) ұнтағы қолданылды. Ni-Cr-Al композитті ұнтағы Al әр түрлі массалық үлесінде (10 %, 15 %, 20 %, 30 %) дайындалды. Ұнтақ қоспасын араластырып механикалық белсендіру үшін BML-6 шарлы диірмені қолданылды. Механикалық белсендіру уақыты 2 сағ, тербеліс жиілігі 30 Гц.

Жүргізілген әдеби шолуларға сәйкес Ni-Cr-Al жабындарына қосылатын алюминийдің оңтайлы мөлшері 8-15 % аралығында болады [82]. Бұл концентрацияда жабын бетінде алюминий оксидінің (Al_2O_3) қажетті мөлшері түзіліп, жабынның коррозияға төзімділігі жоғарылайды. 2.4-суретте (NiCr-Al10%, NiCr-Al15%, NiCr-Al20%, NiCr-Al30%) композициялық ұнтағының сканерлік электрондық микроскопия (СЭМ) әдісімен алынған морфологиясы мен түйіршіктік өлшемді құрамы (2.3-кесте) көрсетілген.

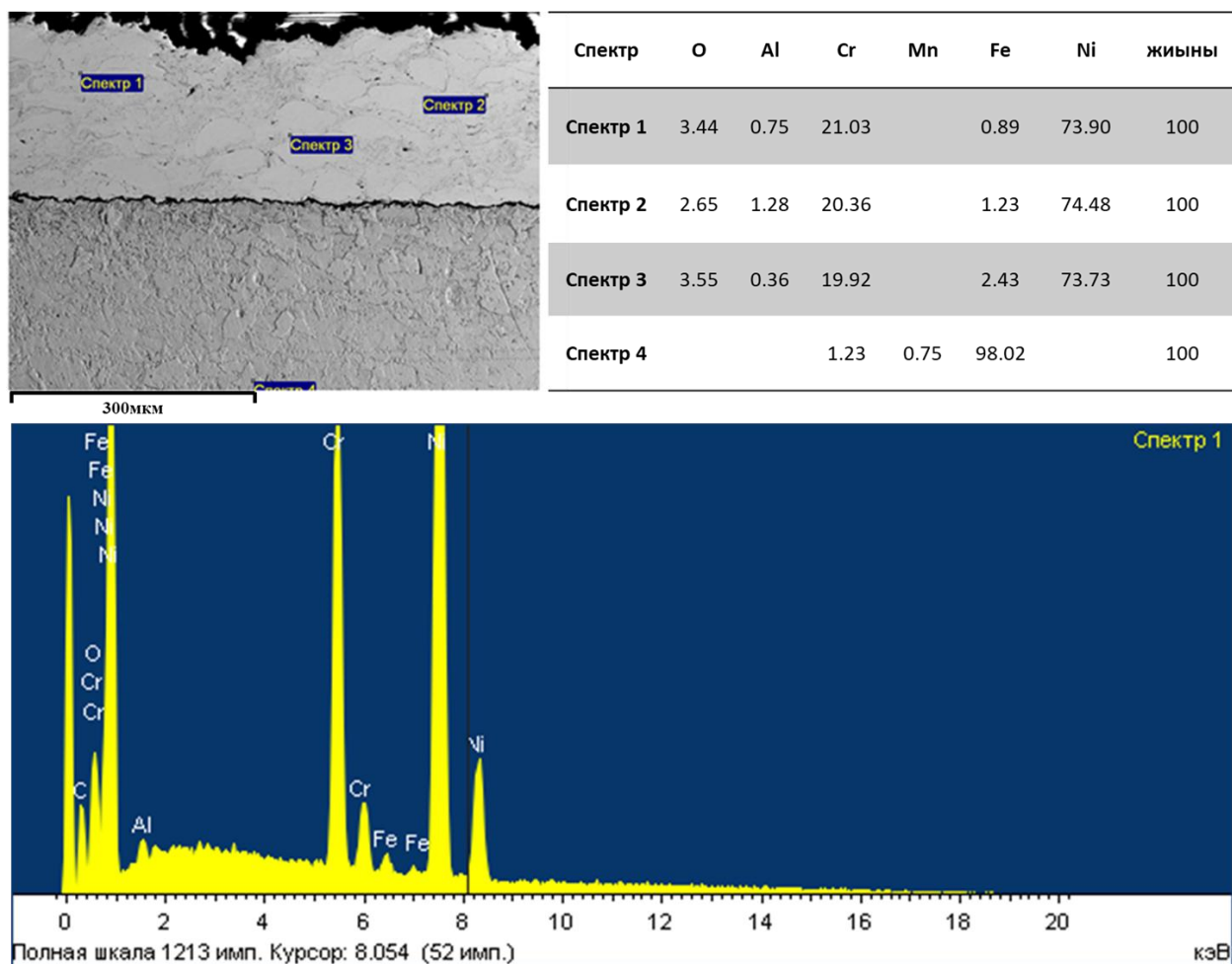
Кесте 2.3 – Композициялық ұнтақтың өлшемді құрамы

Р/н	Композициялық ұнтақтың құрамы	Түйіршіктің орташа өлшемі, мкм
1	NiCr-Al(10 %)	58 ± 16
2	NiCr-Al(15 %)	64 ± 18
3	NiCr-Al(20 %)	68 ± 21
4	NiCr-Al(30 %)	60 ± 18



Сурет 2.4 – NiCr-Al(10%; 15 %; 20 %; 30 %) композитті ұнтағының морфологиясы мен түйіршіктік өлшем құрамы

Детонациялық әдіспен Ni-Cr-Al жабынын алу бойынша алғашқы экспериментте NiCr-Al10% композициялық ұнтағы қолданды. 2.5-суретте NiCr-Al10% жабынының көлденең қимасы мен энергия-дисперсиялық спектрометриямен (EDS - Energy Dispersive Spectroscopy) алынған элементтік талдау нәтижесі көрсетілген. Элементтік талдау нәтижесі жабын құрамында Al пайыздық мөлшері аз екенін анықтады ($\approx 0,78$ мас.%), яғни қорғаныш оксидтік қабат түзу үшін маңызды болып табылатын Al элементінің қарқындылығы төмен. Сондықтан да диссертацияда алюминийдің 15 %, 20 %, 30 % массалық үлесімен алынған Ni-Cr-Al композитті жабындары қарастырылады, бұл алюминийдің жеткілікті оксидтік фазаларының түзілуін қамтамасыз етуге мүмкіндік береді.



Сурет 2.5 – NiCr-Al10% жабынының микроқұрылымы және химиялық құрамы

2.4 Үлгілердің құрамы мен құрылымын зерттеу әдістері

Жабындардың құрылымын зерттеу сканерлік электрондық микроскопия көмегімен MIRA3 (Tescan, Чехия) жасалды. Сонымен қатар детонациялық әдіспен алынған жабындардың құрылымы мен кеуектілігі Olympus BX53M металлографиялық микроскопында зерттелді. Olympus BX53M микроскопының ұлғайтуы 1100 еседен жоғары және контрастау әдістерінің барлық түрінде

жұмыс жасайды (жарық және қараңғы өрістері, поляризация, дифференциалды-интерференциалдық контраст, флуоресценция).

Жабын құрамында элементтердің таралуы INCA ENERGY («Oxford Instruments», Ұлыбритания) энергодисперсиялық спекрометрі көмегімен MIRA3 сканерлік электрондық микроскопында жүзеге асырылды.

Жабындардың фазалық құрамын зерттеу үшін X'PertPRO (PANalytical, Нидерланды) рентгендік дифрактометрі қолданды. Рентгенфазалық талдау CuK α сәулеленуін пайдалана отырып, келесі режимдерде жүргізілді: кернеу U=40 кВ; ток I=30 мА; экспозиция уақыты 1 с; түсірілім қадамы 0,02 °; дифракция бұрышы 2 θ 10°-90°. Дифрактограммаларды талдау HighScore бағдарламасы көмегімен PDF2 дерекқоры арқылы жүргізілді.

2.5 Үлгілердің механикалық-трибологиялық қасиеттерін зерттеу әдістері

Қаттылық пен серпімділік модульді өлшеу. Үлгілердің микроқаттылығын өлшеу MEMCT 6507-1 [108] сәйкес Метолаб 502 (Метолаб, Ресей) құралында жүргізілді. Метолаб 502 өлшеу құралының микроқаттылықты өлшеу әдісі кезінде алмаз инденторға 10 с ішінде қолданылатын статикалық жүктеме (100 г) әсерінен үлгі бетіне із түсірілді. Жүктемені алып тастағаннан кейін индентор ізінің өлшемдері арқылы микроқаттылықтың мәндері келесі формула бойынша анықталды:

$$HV = \frac{P}{S} = \frac{1,854 \times P}{d^2} \quad (2.1)$$

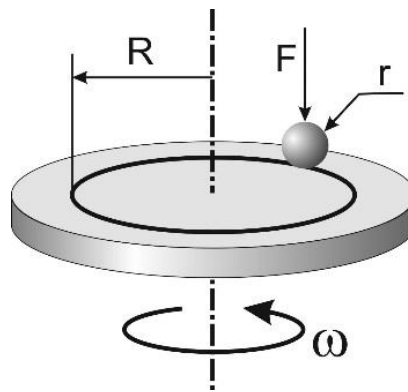
мұндағы, P – алмаз инденторына берілетін қалыпты жүктеме, Н;

S – түскен іздің бүйір бетінің шартты ауданы, мм²;

d – шаршының екі диагональдің ұзындықтарының орташа арифметикалық мәні, мм.

Жабындардың көлденең қимасы бойынша қаттылығы мен серпімділік модулін өлшеу үшін НаноСкан-4DКомпакт (ФГБНУ ТИСНУМ, Ресей) қондырғысы қолданылды. Жабындардың көлденең қимасында қаттылық пен серпімділік модулін өлшеу MEMCT 8.748-2011 [109] стандартына сәйкес NanoScan Device және NanoScan Viewer бағдарламалық жасақтамалары көмегімен жүзеге асады.

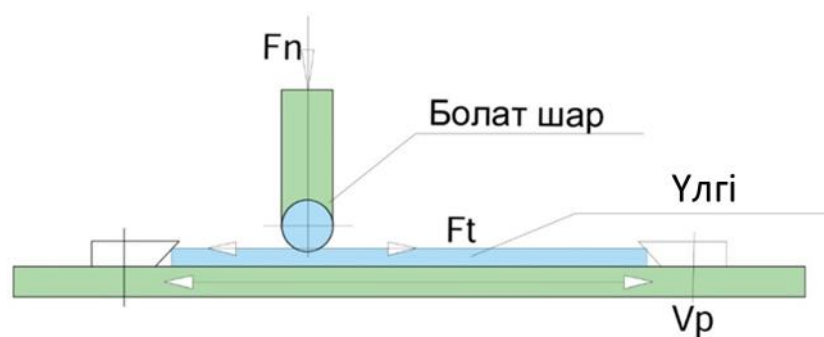
Трибологиялық сынақтар. Детонациялық жабындардың трибологиялық сипаттамалары тозу қарқындылығымен және үйкеліс коэффициентімен сипатталды. Сырғанау үйкелісіне сынауға арналған трибологиялық сынақтар TRB³ трибометрінде (Anton Paar, Швейцария) «Шар-диск» әдісін қолданып ASTM G 99 [110] стандарты бойынша жүргізілді (2.6-сурет). Контрдене ретінде диаметрі 3,0 мм ШХ15 болаттан жасалған шар қолданылды. Сынақтар 10 Н жүктемеде және 3 см/с сызықтық жылдамдықта жасалды. Тозу қисықтық радиусы 4 мм, үйкеліс жолы 100 м болды.



Сурет 2.6 – «Шар-диск» схемасы бойынша үлгілерді трибологиялық сынау

Жабындардың тозу қарқындылығын анықтау Surtronic S-100 Series профилометр көмегімен жүзеге асты. Профилометр көмегімен тозу жолақтарының (wear track) көлденің қимасы бойынша ХСҰ 13565 стандартына сәйкес тозу ауданы анықталып TRB³ трибометрінің InstrumX8.1.10 бағдарламалық жасақтамасы көмегімен тозу қарқындылығының көлемі өлшенді [111].

Жабындардың тозуға төзімділігін «Ілгерінді-кейінді» схемасы бойынша трибологиялық сынақ Вроцлав Ғылым және Технология Университетінің «Машина жасау негіздері және трибология» кафедрасында әзірленген сынақ стендінде өткізілді (2.7-сурет). Әрбір жабын үш рет өлшенді, әрбір өлшем 200 қозғалыс циклінен тұрды. Әр цикл ілгерінді-кейінді қозғалысты қамтыды және ең жоғары жылдамдық ($v_{s_{max}}$) 5 мм/с болды. Әр бағыттағы қозғалыс ұзақтығы 0,4с. Үйкеліс торабына түсетін нормалды жүктеме 20 Н болды. Сынақтарда диаметрі 4 мм (нақты өлшемі 3,969 мм) болат мойынтірек шарлары қолданылды және олар құрғақ үйкеліс жағдайында өткізілді.



Сурет 2.7 – Сынақ стендінің схемасы [112]

Адгезиялық беріктікке сынау. Жабынның жабысу беріктігін тексеру ХСҰ 14916 стандартына сәйкес [113] (аналогы ГОСТ 9.304-87) Elcometer 510 құрылғысы (Elcometer Instruments, Манчестер, Ұлыбритания) арқылы жүргізілді. Үлгілер қарсы бетке 70 МПа теориялық беріктікке ие Epidian 53 суық қататын

эпоксидті желіммен жапсырылды. Сынақ барысында диаметрі 10 мм болатын штифтер және 0,4 МПа/с жүктеме жылдамдығы қолданылды.

Жабындардың беткі кедір-бұдырлығын өлшеу. Профилометр модель 130 құрылғысы арқылы жабындардың беткі кедір бұдырлығы ХСҰ 1302 стандартына сәйкес өлшенді [114]. Бұл құрылғының алмас ұшы өлшену керек үлгі бетін «сипап» жүріп өту арқылы беттің кедір-бұдырлығын өлшейді. Алынған нәтижені сипаттау үшін ең кең тараған және жиі қолданылатын бет профилінің орташа деңгейінен абсолюттік мән бойынша алынған биіктік ауытқуларының арифметикалық орташа шамасы R_a параметрі таңдалып алынды. R_a параметрінің формуласы:

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |Z(x)| dx$$

Мұндағы: L – өлшеу ұзындығы, $Z(x)$ – нақты профиль мен орташа сызық арасындағы ауытқу.

2.6. Үлгілерді ыстыққа төзімділікке сынау әдістемесі

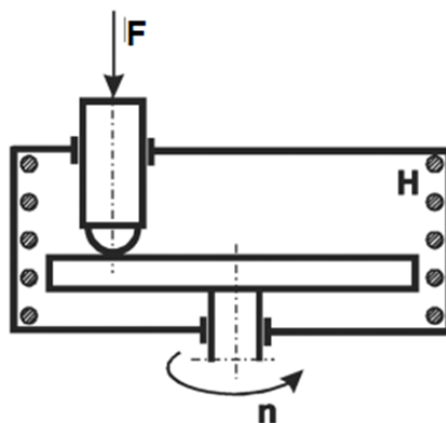
Жоғары температуралық тотығуға сынау. Бұл сынақ үшін үлгілер 15x15x3 мм өлшемінде дайындалып, Ni-Cr-Al жабындары үлгінің алты жағына детонациялық бүрку технологиясымен алынды. Жоғары температуралық тотығуға төзімділікті зерттеу үшін Ni-Cr-Al жабындары бар үлгілер екі түрлі ортада сынақтан өткізілді: зертханалық және өндірістік жағдайларда. Зертханалық жағдайында жоғары температуралық тотығуға сынау керамикалық камерасы бар SNOL 7.2/1100 муфель пешінде жүргізілді, онда үлгілер 2500 °C дейінгі температураға шыдайтын ыстыққа төзімді тигельге орналастырылып, атмосфералық қысымда 1000 °C температурада 1 сағ бойы ұсталып, 20 мин бөлме температурасында салқындатылды (1 цикл). Бұл процесс 50 цикл бойы қайталанды. Сынау режимдері әдеби көздерге негізделе отырып таңдалды [115-117]. Салыстыру мақсатында Ni-Cr-Al жабындарымен қатар 12X1МФ төсеніш болатында жоғары температуралық сынауға ұшыратылды. Сынақтарды бастамас бұрын үлгілердің беті суретке түсіріліп, салмағы өлшенді және әр циклдан кейінде үлгілердің беттері суретке түсіріліп, салмақтары өлшеніп отырды. Лабораториялық сынақтар барысында үлгілердің тотығуға төзімділігі үлгілердің массалық өзгерісін өлшеу, рентгенфазалық талдау (XRD) жүргізу және құрылымдық өзгерістерін зерттеу арқылы бағаланды.

Жоғары температуралық тотығуға сынаудың екінші түрі өндірістік ортада, Өскенмен қаласындағы Согра жылу электр станциясында (ЖЭС) жүргізілді. Бұл сынақта Ni-Cr-Al жабындары бар үлгілер ЖЭС жоғары температуралық (≈ 700 °C) аймағына орналастырылып, екі апта бойы жұмыс жағдайында сыналды. Өндірістік ортадағы жоғары температуралық сынау мерзімі әдеби шолулар негізде таңдалып алынды [118]. Өндірістік ортада өткізілген сынақтардан кейін жабындардың тотығуға төзімділігі рентген фазалық талдау және құрылымдық өзгерістерді микроскопиялық зерттеу арқылы бағаланды.

Ыстық коррозияға сынау. Ыстық коррозия бұл жоғары температуралық ортада тұз қоспаларының (NaCl, Na₂SO₄, V₂O₅) әсерінен металдардың қорғаныш

кабатының бұзылуымен сипатталды. Сынақ үшін детонациялық бүрку технологиясы арқылы сырты Ni-Cr-Al жабындарымен қапталған үлгілер дайындалды. Үлгілердің геометриялық өлшемдері 15x15x3 мм. Сынақтарды бастамас бұрын үлгілердің бастапқы салмағы өлшеніп, беті суретке түсірілді. Сынақтар керамикалық камерасы бар және ең жоғары жұмыс температурасы 1100°C болатын SNOL 7.2/1100 муфельді пешінде жүргізілді. Ыстық коррозияға сынау 700 °C температурада атмосфералық қысымда статикалық ауа ортасында орындалды. Үлгілер 2500 °C дейін төзімді ыстыққа шыдамды тигельге орналастырылды. Сынақ басталғанға дейін олардың бетіне Na₂SO₄(75%)/NaCl(25%) тұзды қоспасы біркелкі жағылды. Сынақ 18 цикл бойы жүргізілді, әрбір цикл келесі сатылардан тұрды: үлгілер 700 °C температурада 1 сағ бойы ұсталынды; 20 мин бойы ауада табиғи жолмен салқындатылды. Үлгілер ультрадыбыстық ваннада дистірленген суда жуылып, кептірілген соң олардың салмағы қайта өлшенді және беті суретке түсірілді. Ыстық коррозияға төзімділікті бағалау циклдік сынақтар барысында салмақ өзгерісін өлшеу, рентгенфазалық талдау жүргізу және құрылымдық өзгерістерді микроскопиялық зерттеу арқылы жүзеге асырылды. Сынақтың бұл режимдері әдеби шолулар негізінде таңдалды, атап айтқанда, S.M. Jiang және әріптестерінің [119] зерттеулерінде көрсетілген әдістемеге сәйкес жүргізілді.

Жоғары температуралық трибологиялық сынау. Жабындарды жоғары температурада тозуға төзімділігін «Шар-диск» схемасы бойынша трибологиялық сынау AGH Ғылым және Технология Университетінің «Машина жобалау және теротехнология» кафедрасындағы Т-21 модельді триботестерінде ХСҰ 20808:2016 стандартына сәйкес жүргізілді [120]. Трибологиялық сынау схемасы 2.8-суретте көрсетілген. Ол айналмалы дисктен және оған жанасып орнатылған шар түріндегі қарсы үлгіден тұрады. Шарға берілген күш (F) арқылы жүктеме түсіріліп, ол айналып тұрған дискке басылады. Жылулық оқшауланған камераның ішінде қуаты 1,5 кВт болатын қыздырғыш (H) орналасқан, ол сынақтарды 750 °C-қа дейінгі температурада жүргізуге мүмкіндік береді. Сынақ барысында үйкеліс күші, дискінің айналу жиілігі (ай/мин), қарсы үлгінің орын ауысуы және үйкеліс торабына жақын камерадағы температураны термопара көмегімен тіркеуге болады. Құрылғы компьютерлік бағдарлама арқылы басқарылады және нәтижелерді үнемі деректер тізбегі түрінде жазып отырады. Бұл деректер кейіннен өңдеуге жіберіледі. Сынақ аяқталғаннан кейін жетек пен қыздырғыштың қуат көзі автоматты түрде өшіріледі. Сынақ уақыты ұзақтығымен (мысалы, 10 000 секунд) немесе дискінің айналым санымен (жүрілген қашықтық), мысалы, 20 000 айналым (цикл) арқылы анықталуы мүмкін. Айналу жиілігі 0,01 ÷ 2 м/с жылдамдық диапазонын қамтамасыз ететіндей етіп реттеледі. Қалыпты жүктеме қарсы үлгіні бекітетін иіңтірекке орналастырылған салмақтар арқылы беріледі. Сынақ параметрлері: күш (нормал) 5Н; цикл саны 5000; із радиусы (тозу ізі радиусы) 3.5мм; сызықтық жылдамдық 0.1 м/с; температура 700 °C; қарсы үлгінің (шардың материалы) Al₂O₃. Сынақтар аяқталғаннан кейін үлгілерді қоршаған орта температурасына дейін салқындатып, тазалау қажет.



Сурет 2.8 – Жоғары температуралық трибологиялық сынау схемасы

ProFilm 3D профилометрi. Жоғары температуралық трибологиялық сынаудан кейінгі үлгілердің беткі профильдері байланыссыз интерферометриялық ProFilm 3D профилометрi көмегімен өлшенді. Үлгілердің көлемдік тозу көрсеткіші (1)-формула бойынша анықталды:

$$W_v = \frac{V}{F_n \cdot s} \left[\frac{mm^3}{N \cdot m} \right] \quad (1)$$

Мұнда:

V – тозған материалдың көлемі [mm^3],

F_n – үлгіге түсірілетін қалыпты күш [Н],

s – үйкеліс жолы [м].

Тозған материалдың көлемі тозу ізінің қималық ауданын төрт жазықтықта – әр 90 градуста – өлшеу негізінде анықталды. Сынақ ұзақтығы жұмыс уақыты мен орнатылған айналу жиілігіне байланысты есептеледі.

Бөлім бойынша қорытынды.

Осылайша, зерттеудің екінші бөлімінде детонациялық бүрку әдісі арқылы Ni-Cr-Al жүйесіндегі қаптамаларын алу үшін қажетті ғылыми-тәжірибелік негіз қалыптастырылды. Жабындарды қалыптастыру процесінде қолданылатын негізгі жабдықтар (детонациялық қондырғы, бүрку параметрлері), бастапқы ұнтақ материалдарының морфологиялық және химиялық сипаттамалары баяндалды. Алынған қаптамалардың құрылымы мен қасиеттерін жан-жақты зерттеу мақсатында металлографиялық талдау, СЭМ, ЭДС, XRD, адгезия мен қаттылықты бағалау сияқты эксперименттік әдістер кешені іріктеліп, олардың қолданылу ерекшеліктері негізделді. Сонымен қатар, жабындардың жоғары температура жағдайындағы төзімділігін бағалау үшін тотығуға төзімділік, ыстық коррозия, жоғары температуралық трибологиялық сынақтар және өндірістік ортада сынау әдістері нақтыланды.

3 ДЕТОНАЦИЯЛЫҚ БҮРКУ ӘДІСІМЕН Ni-Cr-Al НЕГІЗІНДЕГІ ЖАБЫНДАРДЫҢ ҚҰРЫЛЫМЫНЫҢ ҚАЛЫПТАСУ ЗАҢДЫЛЫҚТАРЫН ЗЕРТТЕУ

Бұл бөлімде детонациялық бүрку кезінде Ni-Cr-Al негізіндегі қаптама құрылымының қалыптасуын зерттеу бойынша келесі тәжірбиелер жасалды:

- детонациялық оқпанды жарылғыш газбен толтыру көлемін 25%, 30%, 40% және 50% өзгерткен кезде Ni-Cr-Al жабынының морфологиясы мен элементтік құрамы зерттелді;

- детонациялық бүрку әдісімен элементтердің таралуы бойынша градиентті құрылымды Ni-Cr-Al қаптаманың қалыптасуы Al әр түрлі массалық үлесінде (15 %; 20 %; 30 %) зерттелді;

- элементтердің таралуы бойынша біртекті және градиентті Ni-Cr-Al детонациялық жабындарының қасиеттеріне салыстырмалы зерттеулер жасалды.

Диссертациялық жұмыстың зерттеу нәтижелері [121-130] ғылыми мақалаларында жарияланды.

3.1 Детонациялық бүрку кезінде Ni-Cr-Al негізіндегі қорғаныш қабаттарының құрылымының қалыптасуын зерттеу

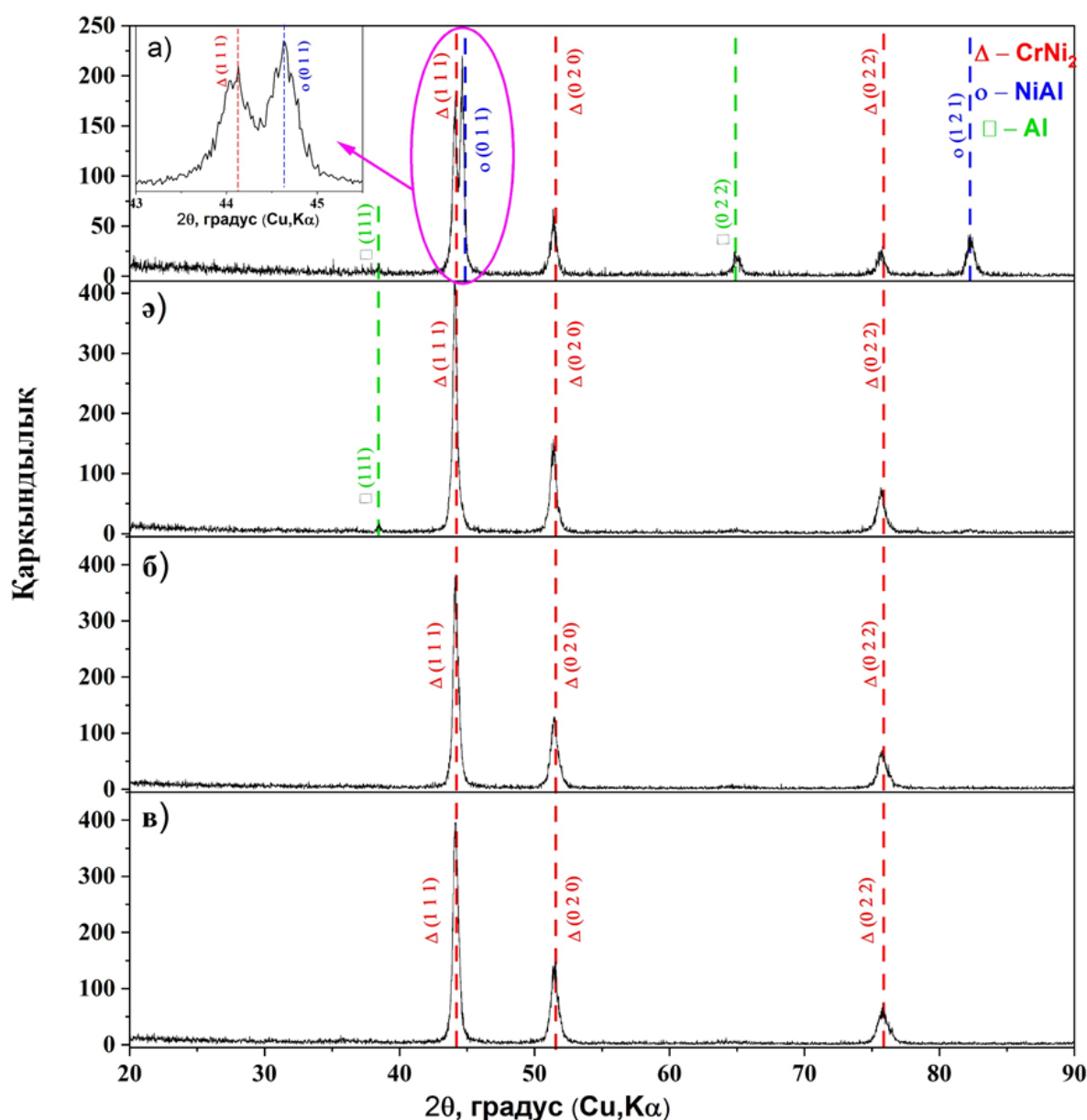
Детонациялық бүрку кезінде жабынның қалыптасуын анықтайтын негізгі фактор – жарылғыш газдар қоспасының (оттегі-ацетилен) деңгейі. CCDS2000 қондырғысында детонациялық оқпандағы жарылғыш газ көлемі мен арақатынасын арнайы клапандар арқылы реттеуге болады. Оттегі-ацетилен қоспасы ұнтақ материалдарды детонациялық бүрку үшін кең қолданылатын жарылғыш газ болып табылады. Ni-Cr-Al жабынын алу үшін оттегі-ацетилен қоспасының арақатынасы $O_2/C_2H_2=1,856$ тең болды. Жабын алудың детонациялық бүрку процессі дискретті сипатқа ие, яғни бір циклға шоғырланған ретімен орындалатын келесі операциялардан тұрады: детонациялық оқпанды жарылғыш газдар қоспасымен толтыру; оқпанға ұнтақтарды беру; оқпандағы жарылыс. Алынатын жабынның қалыңдығы цикл санына байланысты. Детонациялық бүрку процессінің жылулық әсерін жабынның қалыптасуына әсерін зерттеу үшін детонациялық оқпанды жарылғыш газбен толтыру көлемі 25 %, 30 %, 40 % және 50 % таңдалып алынды. Детонациялық Ni-Cr-Al жабынын алу үшін оңтайлы параметр ретінде ату саны 40 және бүрку қашықтығы 150 мм деп таңдап алынды. Детонациялық бүрку қашықтығы 50-200 мм аралығында өңделетін бет пен ұнтақ материалына байланысты анықталады. 3.1-кестеде детонациялық бүрку әдісімен NiCr-Al(20%) негізіндегі жабынның құрылымы мен фазалық құрамының қалыптасуын зерттеу үшін жасалған эксперименттің параметрлері көрсетілген.

3.1-суретте NiCr-Al(20%) негізіндегі жабынның детонациялық оқпанды жарылғыш газбен толтыру көлемі 25 %, 30 %, 40 % және 50 % өзгерткен кездегі рентгенфазалық талдау нәтижелері көрсетілген. Оқпанды жарылғыш газдармен 40% және 50% толтырған кезде NiCr-Al(20%) жабыны тек CrNi₂ фазасынан тұрады (сурет 3.1 б,в). Оқпанды жарылғыш газ қоспасымен толтыру деңгейінің

төмен мәндерінде, яғни 25%, 30%, қарқындылығы төмен Al дифракциялық шыңы мен NiAl фазасының түзілгені байқалды (сурет 3.1 а,ә).

Кесте 3.1 – Ni-Cr-Al жабындарын алу үшін қолданған детонациялық бүркудің технологиялық параметрлері:

№	O ₂ /C ₂ H ₂	Оқпанды толтыру көлемі, %	Бүрку қашықтығы, мм	Цикл саны
1	1,856	25	150	40
2	1,856	30	150	40
3	1,856	40	150	40
4	1,856	50	150	40

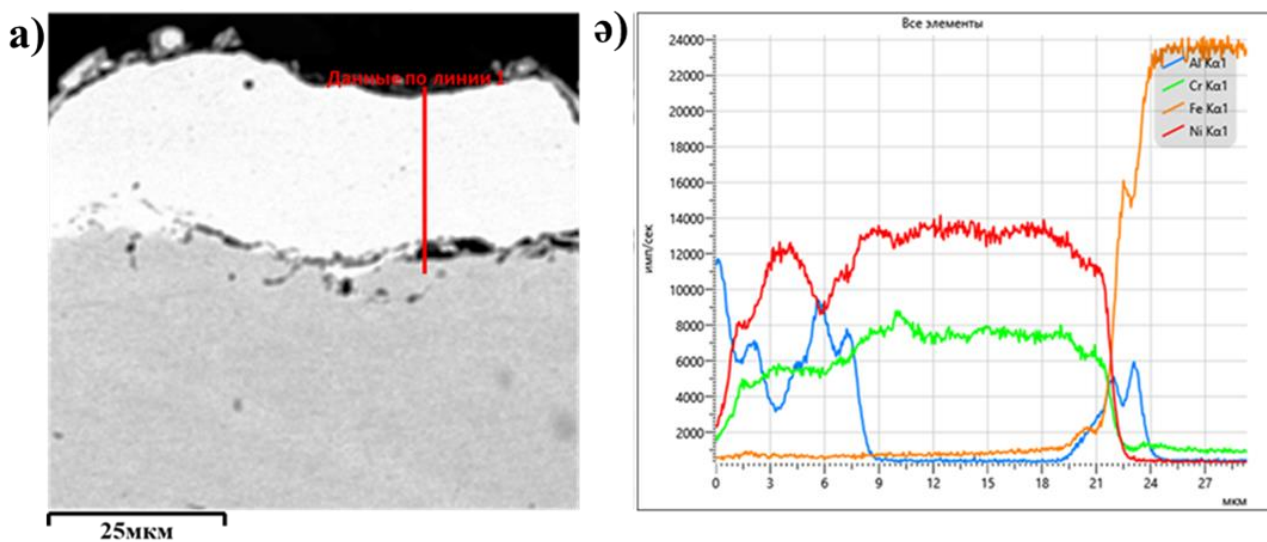


а) 25 %; ә) 30 %, б) 40 %; в) 50 %

Сурет 3.1 – Оқпанды жарылғыш газбен толтыру көлемін өзгерткен кезде алынған Ni-Cr-Al жабындарының дифрактограммалары

Композитті ұнтақ бөлшектерінің детонациялық жалында балқып, үлкен жылдамдықпен төсеніштің бетіне бүркілген кездегі жүретін процестер жабынның қалыптасуы үшін маңызды рөл атқарады. Гомогенді материалдарды детонациялық бүрку кезінде бөлшектердің беткі қабаты фазааралық шекара болып табылады, бүрку кезіндегі негізгі процестер балқыған бөлшектердің қоршаған ортамен әрекеттесуімен шектеледі (тотығу, азоттану, қалпына келу және т.б.). Композитті ұнтақ материалдарда гетерогенді құрылымның пайда болуы бөлшектердің ішінде жаңа фазааралық беттерінің түзілуімен түсіндіріледі. Көп таралған композиция типтері үшін (металл-металл, металл-тотық, металл-отқа төзімді қосылыс) келесі процестер жүруі мүмкін деп болжауға болады: 1) балқыған жабын компоненттерінің өзара жайылуы немесе жиырылуы; 2) қорытпалардың түзілуі; 3) интерметалдық қосылыстардың синтезі; 4) бастапқы қосылыстар мен металл балқымаларының (немесе өзара) әрекеттесуі нәтижесінде жаңа фазалардың түзілуі; 5) бөлшек материалының қоршаған газ ортасымен әрекеттесуі. Фазааралық құбылыстардың соңғы үш типі жабын алу процесінің жылулық эффектісінің шамасына байланысты іске асатынын айта кету қажет.

Детонациялық оқпанды жарылғыш газ қоспасымен 25 % толтыру арқылы алынған Ni-Cr-Al жабынының көлденең қимасының құрылымы мен энергия-дисперсиялық спектроскопия әдісімен алынған элементтік таралуы 3.2-суретте көрсетілген.



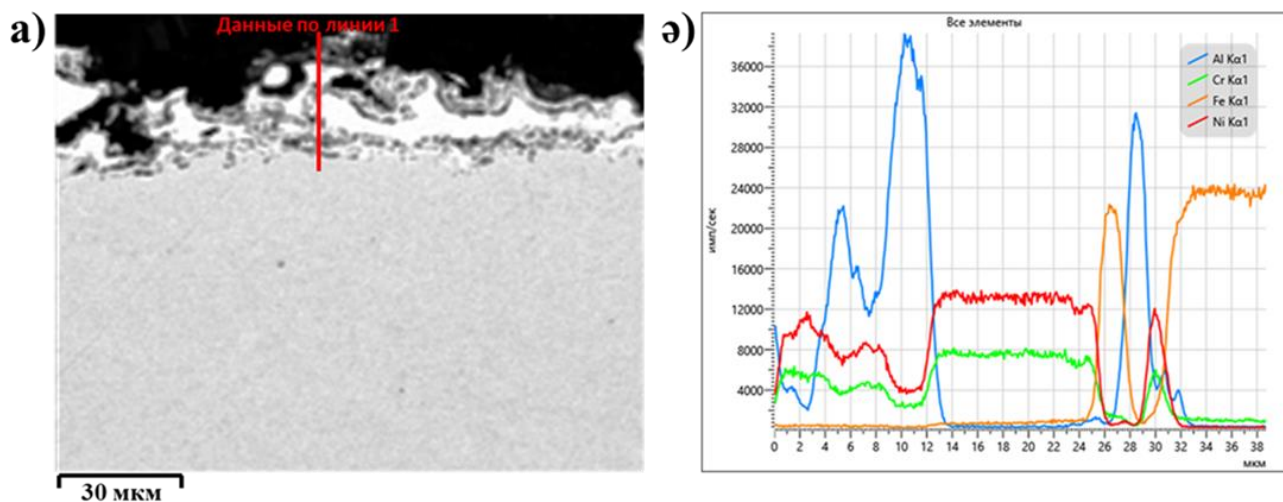
а) жабынның құрылымы; ә) элементтік талдау нәтижесі

Сурет 3.2 – Детонациялық оқпанды жарылғыш газбен 25 % толтыру арқылы алынған NiCr-Al(20 %) жабынының көлденең қимасы

Алынған жабынның көлденең қимасы бойынша элементтердің таралу графигі (3.2ә-сурет) алюминийдің (Al) концентрациясы жабынның бетінде жоғары екендігі, ал никель (Ni) мен хромның (Cr) үлесі жабынның ішкі қабаттарында басым екендігі байқалады. Элементтердің таралу графигі бойынша жабынның беткі қабатында (≈ 3 мкм) алюминий (Al) мен никельдің (Ni)

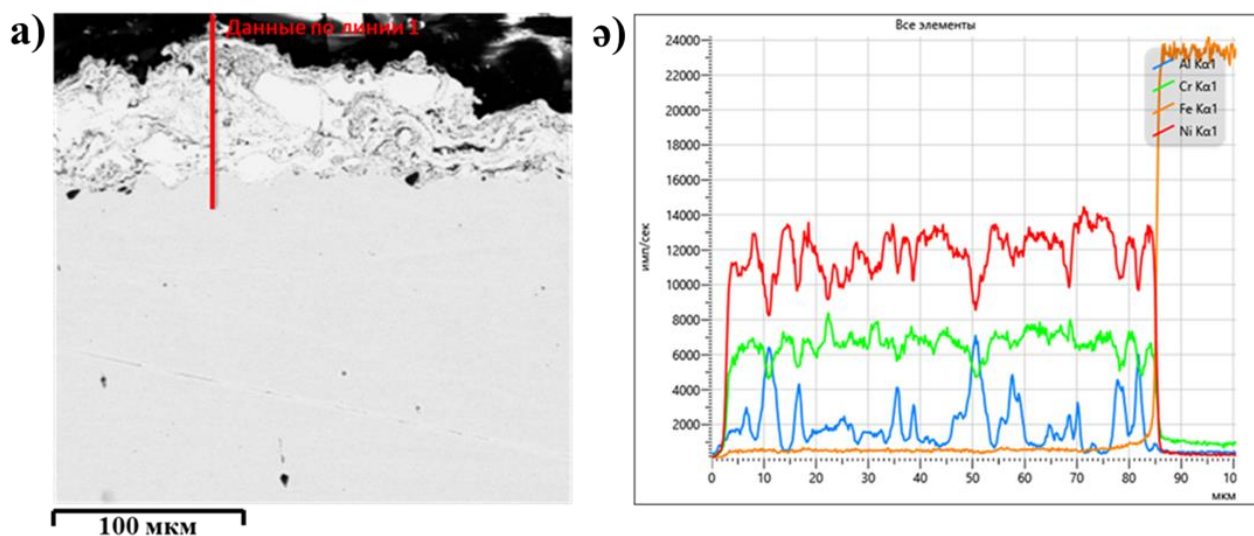
концентрациясы айтарлықтай жоғары. Беткі қабатта Al мен Ni жоғары болуы жабын алу процессі кезінде NiAl интерметалидінің түзілуіне ықпал жасайды және бұл тұжырымды ретгенфазалық талдау нәтижесі растайды (3.1a-сурет). 3.2a-суреттен жабынның құрылымы тығыз, кеуектілігі төмен және біртекті екені байқалады, қалыңдығы шамамен 25-27 мкм. Алайда жабын мен төсеніш арасындағы шекаралық аймақ анық байқалады, яғни жабынның адгезиялық беріктігі төмен. Жалпы теория тұрғысынан жабын мен төсеніштің өзара байланысын бірнеше кезеңдерге бөліп қарастырады. Бірінші кезеңде төсеніш пен жабын бөлшектерінің атомаралық өзара әрекеттесу қашықтығында бір-біріне жақындауы. Екінші кезеңде электрондық өзара әрекеттесуге негізделген процесстер нәтижесінде атомдар арасында химиялық байланыстың пайда болуы. Үшінші кезеңде ұзақ уақыт жоғарғы температураның әсерінде немесе дефекті құрылымды жоғарлату арқылы белгілі дәрежеде диффузия коэффициентін қамтамасыз ету арқылы жүзеге асатын жабын мен төсеніш бөлшектерінің көлемдік әсерлесуі. Детонациялық бүрку кезінде жабын мен төсеніш арасындағы мықты байланысты химиялық өзара әрекеттесу кезеңі анықтайды. Яғни жабынның адгезиялық және когезиялық беріктігі бөлшектердің температурасына, жылдамдығына (байланыс аймағындағы қысымға) және химиялық әрекеттесудің ұзақтығына байланысты анықталады. Қортындылай айтқанда оқпанды жарылғыш газбен толтырудың төмен деңгейі (мысалы 25 %) жабынның адгезиялық беріктігіне кері әсер етеді.

Детонациялық оқпанды жарылғыш газ қоспасымен 30 % толтыру арқылы алынған NiCr-Al(20%) жабынын зерттеу нәтижесі 3.3-суретте көрсетілген. Жабынның қалыңдығы шамамен 30-32 мкм, жабынның беткі қабатында бос қуыстар мен кеуектер байқалады. Жарылғыш газ қоспасының көлемі 30 % болғанда жабынның микроқұрылымы Al және NiCr қабаттарының жеке консолидациясы нәтижесінде қалыптасқын элементтік талдау нәтижесі дәлелдейді (3.3ә-сурет). Яғни детонациялық бүрку кезіндегі газдардың жарылыс энергия Al балқытып, NiCr бөлшектерін қажетті деңгейде қыздыруға жеткіліксіз болғандықтан жабын компоненттері өзара әрекеттеспеуі мүмкін. Детонациялық бүрку кезінде газдардың жарылыс энергиясын өзгерте отырып, ұнтақ бөлшектерінің температурасы мен жылдамдығын басқаруға болады. Бүрку режимін өзгерткен кездегі олардың (температура мен жылдамдық) вариациясы жабын сапасының қалыптасуын анықтайды. Алынған нәтижелерге сүйене отырып детонациялық оқпанды жарылғыш газ қоспасымен 25 % және 30 % толтырған кездегі жарылыс энергиясын NiCr-Al(20 %) композициялық ұнтағын бүрку кезіндегі сапалы жабынның қалыптасуына жеткіліксіз деген қортынды жасауға болады. Оқпанды 40 % жарылғыш газ қоспасымен толтырғанда ғана салыстырмалы деңгейде элементтердің таралуы біртекті (3.4ә-сурет), кеуектілігі төмен детонациялық NiCr-Al(20 %) жабыны қалыптасты. Жабынның қалыңдығы шамамен 90 мкм (3.4a-сурет).



а) жабының құрылымы; ә) элементтік талдау нәтижесі

Сурет 3.3 – Детонациялық оқпанды жарылғыш газбен 30 % толтыру арқылы алынған NiCr-Al(20 %) жабынының көлденең қимасы

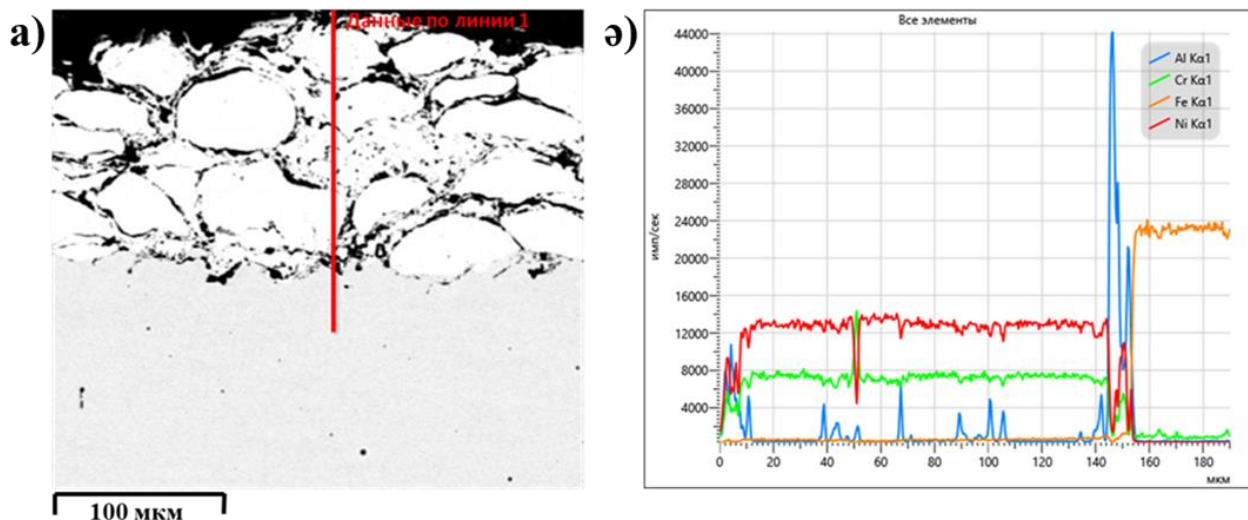


а) жабының құрылымы; ә) элементтік талдау нәтижесі

Сурет 3.4 – Детонациялық оқпанды жарылғыш газбен 40 % толтыру арқылы алынған NiCr-Al(20 %) жабынының көлденең қимасы

Детонациялық оқпанды жарылғыш газ қоспасымен 50 % толтыру арқылы алынған NiCr-Al(20%) жабынының құрылымы қабаттасқан ірі конгломераттардан құралған (3.5a-сурет). Жабынның қалыңдығы шамамен 160 мкм. Элементтік талдау нәтижесі жабының Ni және Cr элементтерінен тұратынын көрсетті (3.5ә-сурет). Al концентрациясы тек жабын мен төсеніштің шекаралық аймағында ғана анықталды. NiCr-Al(20 %) композициялық ұнтақтың бастапқы өлшемі 68 ± 21 мкм болғанын ескере отырып (2.3-кесте), бұл конгломераттар балқымаған NiCr ұнтағы деп тұжырым жасауға болады. Яғни детонациялық бүрку кезінде ұсақ фракциялы бөлшектер жылдамырақ балқып жабын матрицасын түзесе, өлшемі үлкен ұнтақ бөлшектері жоғарғы температура мен детонациялық соққы нәтижесінде деформацияланып жабын құрылымын

құрайды. Детонациялық жабынның қалыңдығы артқан сайын астыңғы қабаттағы жабын құрылымы импульсті детонациялық соққы әсерінен ұсақталып, тығыз және құрылымы біркелкі жабын түзіледі.



а) жабынның құрылымы; ә) элементтік талдау нәтижесі

Сурет 3.5 –Детонациялық оқпанды жарылғыш газбен 50 % толтыру арқылы алынған NiCr-Al(20 %) жабынның көлденең қимасы

Детонациялық бүрку арқылы NiCr-Al(20%) негізіндегі жабынның қалыптасуын зерттеу бойынша төмендегі қортындылар жасалды:

- арақатынасы $O_2/C_2H_2=1,856$ болатын оттегі-ацетилен қоспасымен детонациялық оқпанды 25 % және 30 % толтыру (ату саны 40 және бүрку қашықтығы 150 мм) арқылы алынған жабынның құрамын рентгенфазалық талдау нәтижесі негізгі $CrNi_2$ фазасын, таза Al элементі мен NiAl интерметаллидтік қосылысын анықтады. Жабын құрамында таза Al болуы жоғарғы температурда оксидтердің түзілуін (Al_2O_3 және Cr_2O_3) қамтамасыз етіп, жабынның ыстыққа төзімділігін арттырады. Алайда аталған режимде алынған жабынның кеуектілігі жоғары, қалыңдығы мен адгезиялық беріктігі төмен;

- арақатынасы $O_2/C_2H_2=1,856$ болатын оттегі-ацетилен қоспасымен детонациялық оқпанды 40 % және 50 % толтыру NiCr-Al(20%) негізіндегі жабынды алу үшін оңтайлы режимдер ретінде қарастырылады. Алайда жарылыс зарядының энергиясын 40 % және 50 % дейін арттырған жағдайда, алынған жабын құрамында тек $CrNi_2$ фазасы анықталады;

Сонымен зерттеу нәтижелері бойынша алынған қортындылар градиентті құрылымды жабын алуға негіз болып саналады.

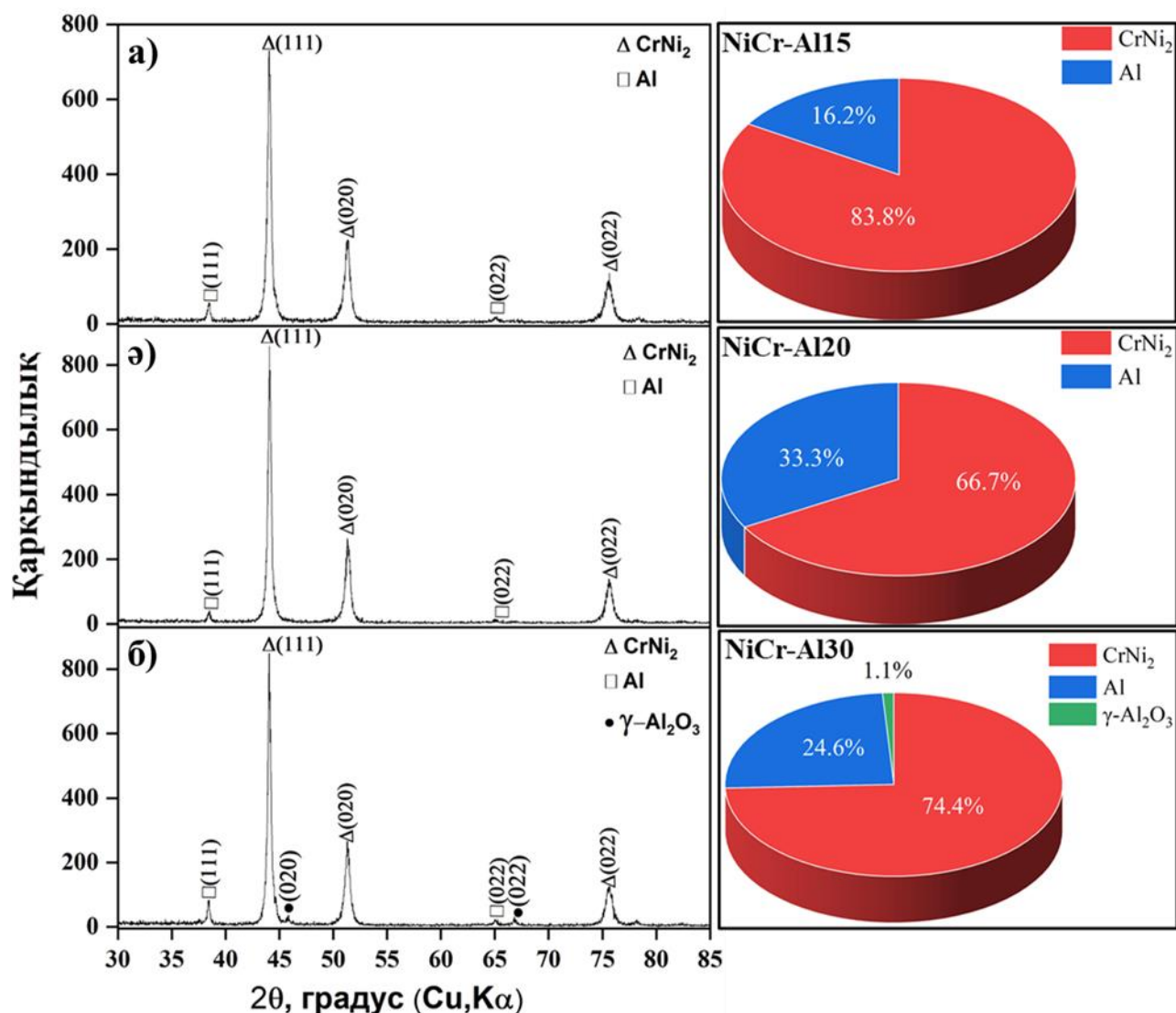
3.2 Детонациялық бүрку әдісімен Ni-Cr-Al негізіндегі градиентті қорғаныш қабатын алу

Градиентті құрылымды Ni-Cr-Al жабынын алу үшін детонациялық бүрку әдісінің режимдері 3.2-кестеде көрсетілген. Градиентті жабын алу үшін бір дозаторлы CCDS2000 детонациялық қондырғысы қолданылды.

Кесте 3.2 – Градиентті құрылымды Ni-Cr-Al жабын алу үшін қолданылған детонациялық бүркудің технологиялық режимдері

Жабын қабатының реті (төсеніш бетінен бастап)	Оқпанды толтыру көлемі, %	Ату саны	O_2/C_2H_2	Бүрку қашықтығы, мм
1	50	10	1,856	150
2	40	10		
3	30	10		
4	25	10		

Градиентті құрылымды жабының қалыптасуын NiCr-Al композитті ұнтағын алюминийдің әртүрлі массалық үлесінде келесі құрамда зерттелді: NiCr(85%)-Al(15%); NiCr(80%)-Al(20%); NiCr(70%)-Al(30%). 3.6-суретте детонациялық бүрку әдісімен әр түрлі Al мөлшерінде алынған градиентті жабындарының рентгенфазалық талдау нәтижесі көрсетілген. Зерттелген барлық градиентті жабындардың фазалық құрамы Al және $CrNi_2$ фазаларынан тұрады. Тек, NiCr-Al(30%) градиентті жабынында қосымша $\gamma-Al_2O_3$ фазасының түзілгені анықталды (сурет 3.6б). Рентгенфазалық талдау нәтижесі бойынша алюминий (Al) фазасының түзілуі жабын құрамындағы алюминий мөлшері 20 % дейін артқанда көбейіп (сурет 3.6а,ә), ал 30 % болғанда азаятынын көрсетеді. Яғни Al 20% концентрациясы Ni-Cr байланыстарын тұрақтандыруы мүмкін, ал 30% жағдайында Al детонациялық бүрку кезіндегі тотығу реакциясы әсерінен $\gamma-Al_2O_3$ фазасына айналады. $\gamma-Al_2O_3$ фазасы термиялық бүрку әдістерімен алу кезінде композитті ұнтақтың жылдам салқындау нәтижесінде түзіледі.

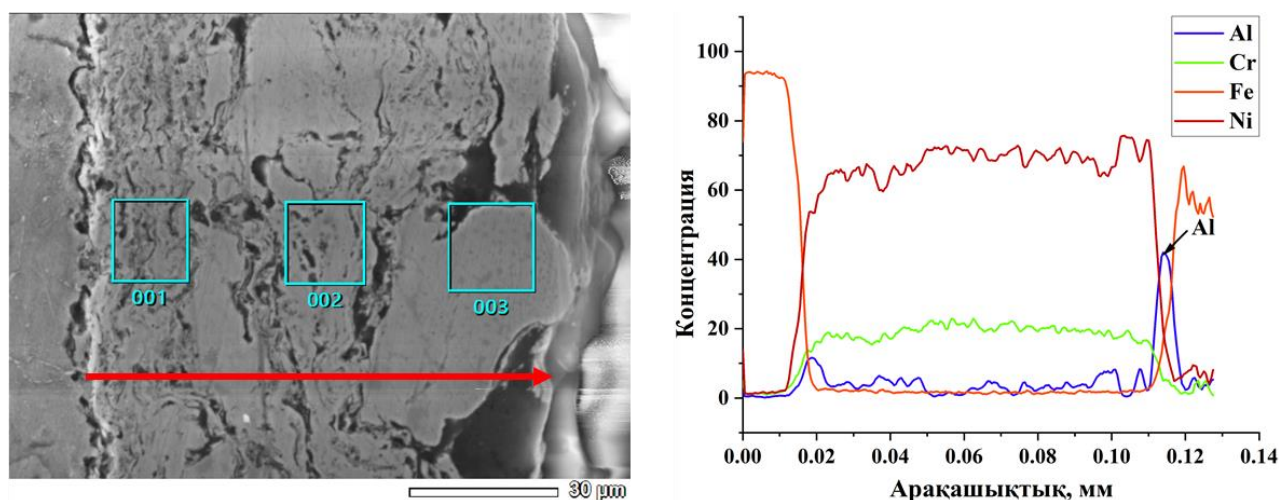


а) NiCr-Al(15%); ә) NiCr-Al(20%); б) NiCr-Al(30%);

Сурет 3.6 – Al әр түрлі массалық үлесіндегі Ni-Cr-Al градиентті жабындарының құрамын рентгенфазалық талдау нәтижесі

3.7-суретте детонциялық бүрку әдісімен алынған NiCr-Al(15%) жабынының көлденең қимасы бойынша элементтердің (Al, Cr, Ni, Fe) сызықтық таралуы көрсетілген. Жабын қабаты бойынша элементтердің концентрациялық кескінде Cr және Ni біркелкі тараған және олардың пайыздық мөлшері Cr-Ni жүйесінің фазалық күй диаграммасы бойынша (1.3-сурет) CrNi₂ фазасына сәйкес келеді. Рентгенфазалық талдау нәтижесі бойынша CrNi₂ жабынның негізгі құраушы фазасы болып табылады. Элементтердің концентарциялық кескінінде Al жабын қабаты бойынша өте аз мөлшерде тараған, тек ғана жабынның бетінде Al концентрациясының күрт артқанын көруге болады. Жабынның беткі қабатында темірдің жоғарғы концентрациясы үлгінің көлденең қимасын дайындағанда болат төсеніштен болған ластанумен байланысты болуы мүмкін. Сонымен қатар NiCr-Al(15 %) жабынының құрамы 3.7-суретте бейнеленгендей локалды аймақ түрінде жабынының әртүрлі бөліктері бойынша зерттелді және 001, 002, 003

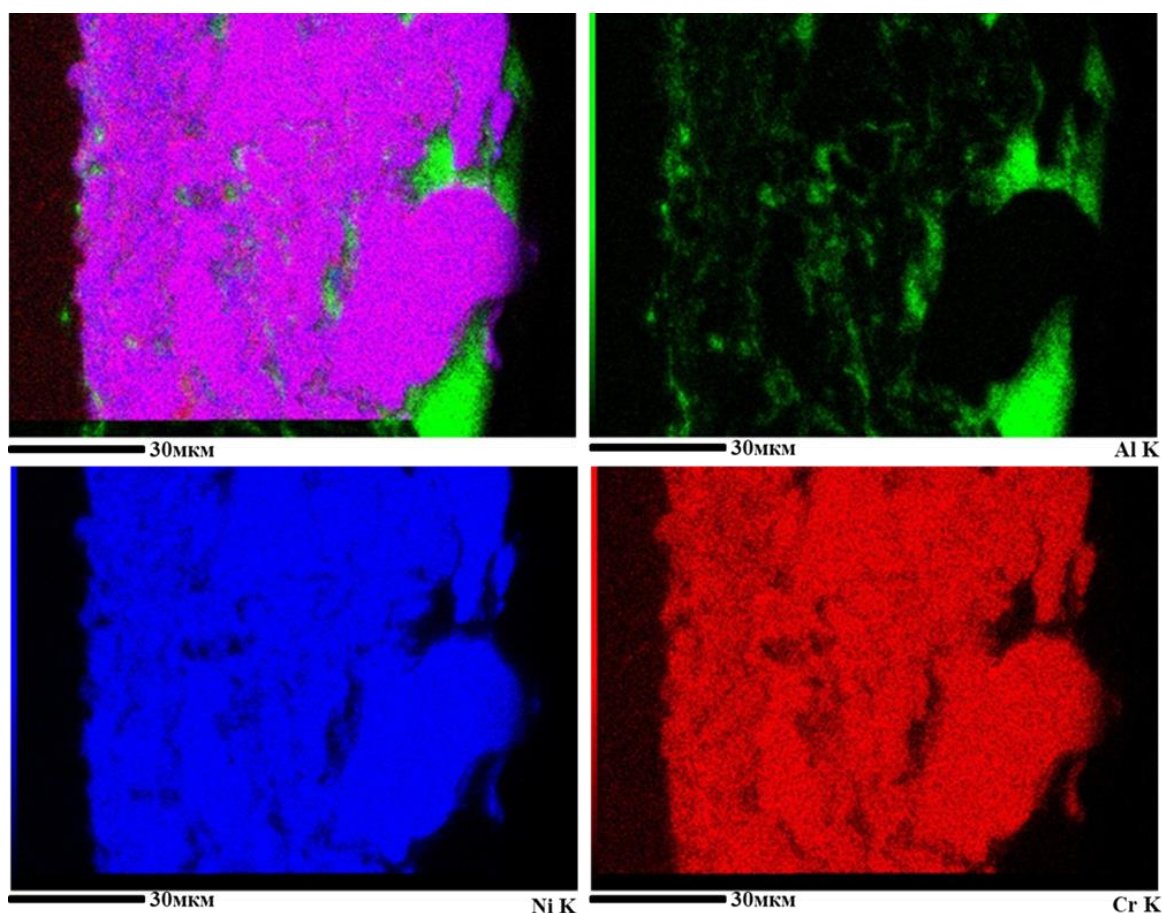
спектрлері нәтижелері суретте кестеде көрсетілген. Al атомдық пайызды мөлшері төсеніштен жабын бетіне қарай аздап артқанын көруге болады. Зерттеу нәтижелері алюминийдің жабын құрамында күтілген 15 % әлде қайда төмен, яғни жуықтап алғанда 5 % екенін көрсетті.



Спектр	O, ат. %	Al, ат. %	Cr, ат. %	Fe, ат. %	Ni, ат. %	Жалпы, %
001	-	4.75	20.99	2.17	72.09	100.00
002	3.64	5.52	20.79	1.58	68.47	100.00
003	1.78	5.16	20.41	1.95	70.70	100.00

Сурет 3.7 – NiCr-Al(15%) жабынның көлденең қимасы бойынша элементтердің таралуын зерттеу нәтижесі

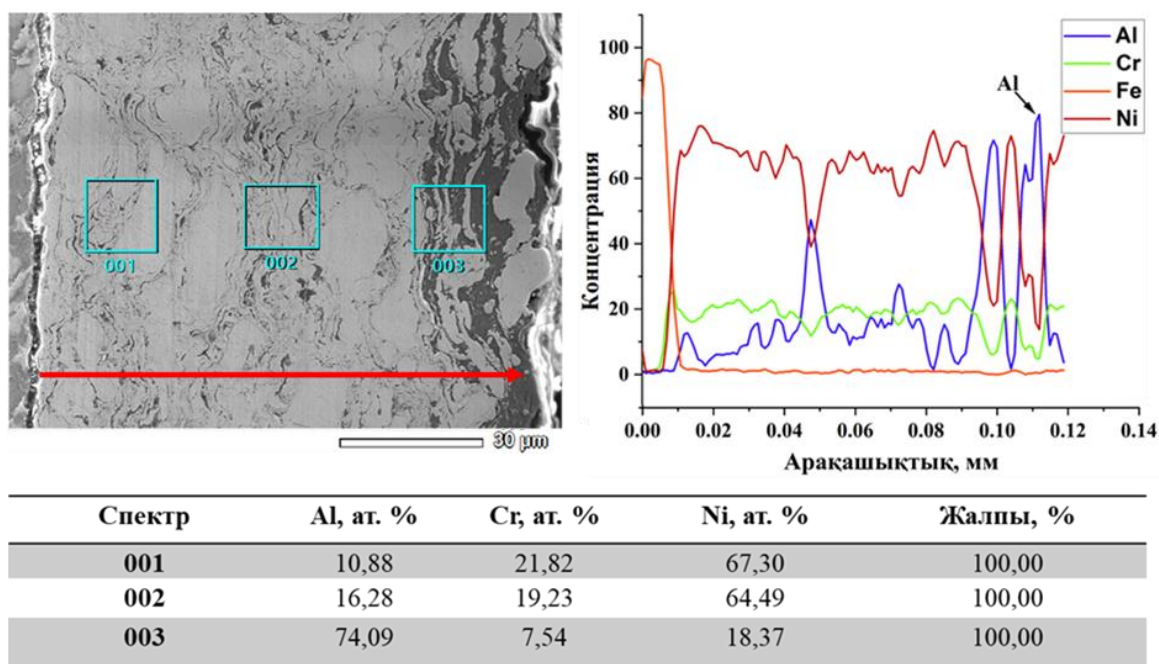
NiCr-Al(15%) жабынының көлденең қимасы бойынша элементтердің таралу картасы 3.8-суретте көрсетілген. Элементтердің таралу картасында жабын құрамында Al концентрациясы өзгертін әртүрлі аймақтарды анық көруге болады (суретте Al жасыл түспен көрсетілген). Al концентрациясы жабын құрамында өте төмен деңгейде, тек жабынның беткі қабатында локалды аймақтарда шоғырланған. Al жабын бетінде біркелкі таралмауы, жабынның жоғарғы температурада тотығу кезінде Al_2O_3 қорғаныш оксидінің жеткіліксіз түзілуіне себеп болады. Жабын құрамында Cr мен Ni біркелкі тараған, яғни бұл элементтер жабынның негізгі құрылымын құрайтынын дәлелдейді. Сонымен энергодисперстік спектроскопия (EDS) әдісімен жабынның құрамын әртүрлі тәсілдерді қолданып зерттеу (сызықтық, локалды және карталық таралу) бірдей нәтиже көрсетіп, жабын құрамында Al 15% мөлшері жоғарғы температурада қолданылатын градиентті құрылымды Ni-Cr-Al жабын алуға жеткіліксіз деген қортынды жасауға негіз бола алады.



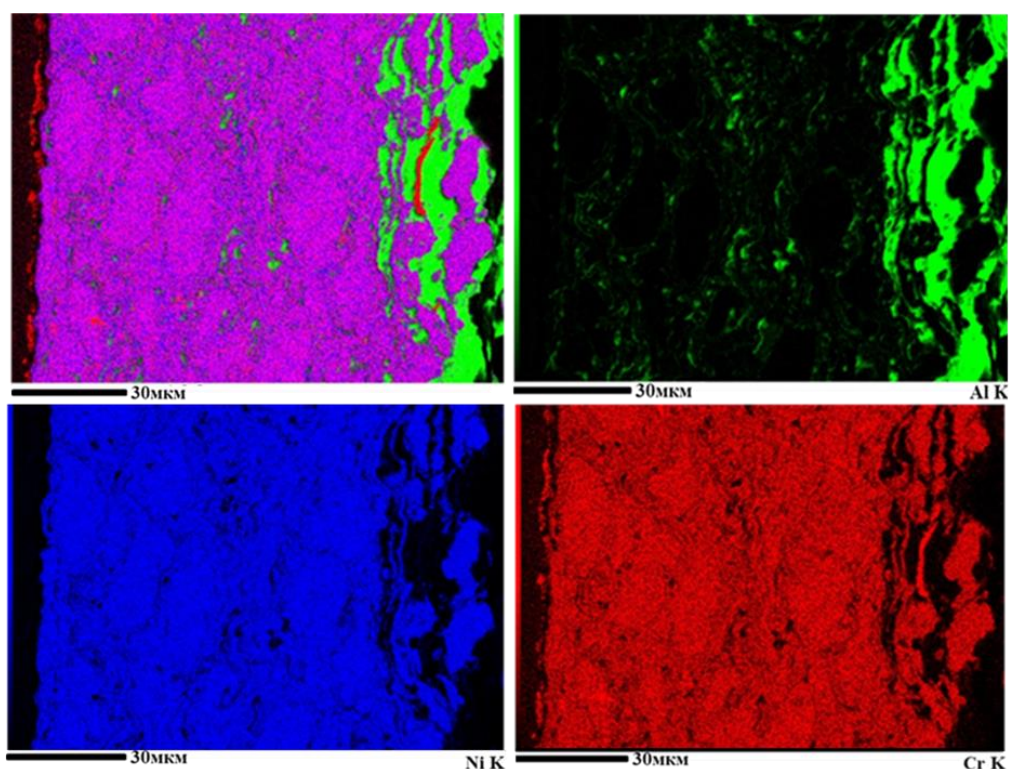
Сурет 3.8 – NiCr-Al(15%) жабынның көлденең қимасы бойынша элементтердің таралу картасы

3.9-суретте детонциялық бүрку әдісімен алынған NiCr-Al(20%) жабынының көлденең қимасының химиялық элементтік құрамын зерттеу нәтижесі көрсетілген. NiCr-Al(20%) жабынының қалыңдығы шамамен 100 мкм. NiCr-Al(20%) жабынында Al элементінің концентрациясы NiCr-Al(15%) жабынымен салыстырғанда жоғары екенін байқауға болады. Элементтердің жабын қалыңдығы бойынша сызықтық таралуын зерттеу нәтижесі (3.9-суретте көк түсті бағыттаушы көрсеткі) Al мөлшері жабынның беткі қабатына қарай біртіндеп артқанын көрсетеді. Жабынның беткі қабатынан алынған локалды аймақтың (3.9-суретте спектр 003) элементтік құрамында Al жалпы үлестік мөлшері жуықтап алғанда 74 % болса, қалған бөлігін Cr мен Ni құрайды. Зерттеу нәтижелері негізінде Ni-Cr-Al жабыны құрамында Al 20% мөлшері, химиялық элементтік құрамы бойынша градиентті құрылымды жабынның қалыптасуына ықпал ететінін көруге болады. Cr мен Ni элементтерінің өзара концентрациялық арақатынасы жабынның фазалық құрамы CrNi_2 қосылысынан тұратынын дәлелдейді. 3.9-суретте көрсетілген NiCr-Al(20%) жабының микроқұрылымын NiCr-Al(15%) жабынымен салыстырған кезде (сурет 3.7), оның кеуектілігінің төмен екенін көруге болады. 3.10-суретте көрсетілген NiCr-Al(20 %) жабынының энергодисперстік спектроскопия (EDS) әдісімен алынған элементтік таралу картасы көрсетілген. Al төсенішке жақын аймақта аз, жабын ішінде

біртіндеп артып, оның беткі қабатында көп мөлшерде шоғырланған (3.10-сурет жасыл түсті карта). Al жабын ішінде градиентті таралуы жабын бетінде біркелкі және үздіксіз оксид қабының түзілуіне жағдай жасап, жабынның жоғары температурада коррозиялық тұрақтылығына ықпал етеді.



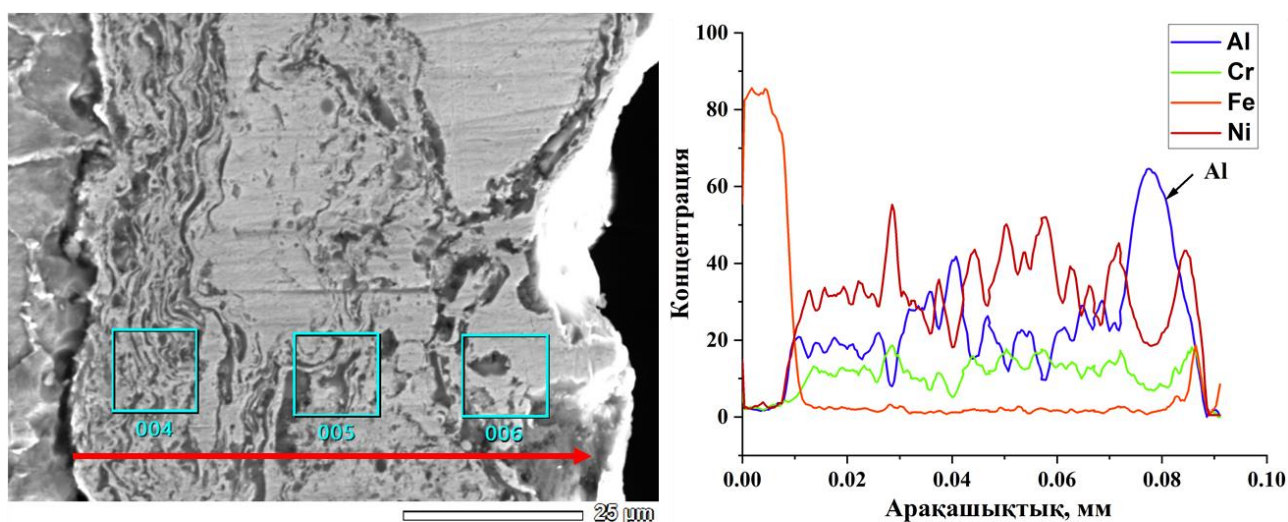
Сурет 3.9 – NiCr-Al(20 %) жабынның көлденең қимасы бойынша элементтердің таралуын зерттеу нәтижесі



Сурет 3.10– NiCr-Al(20 %) жабынның көлденең қимасы бойынша элементтердің таралу картасы

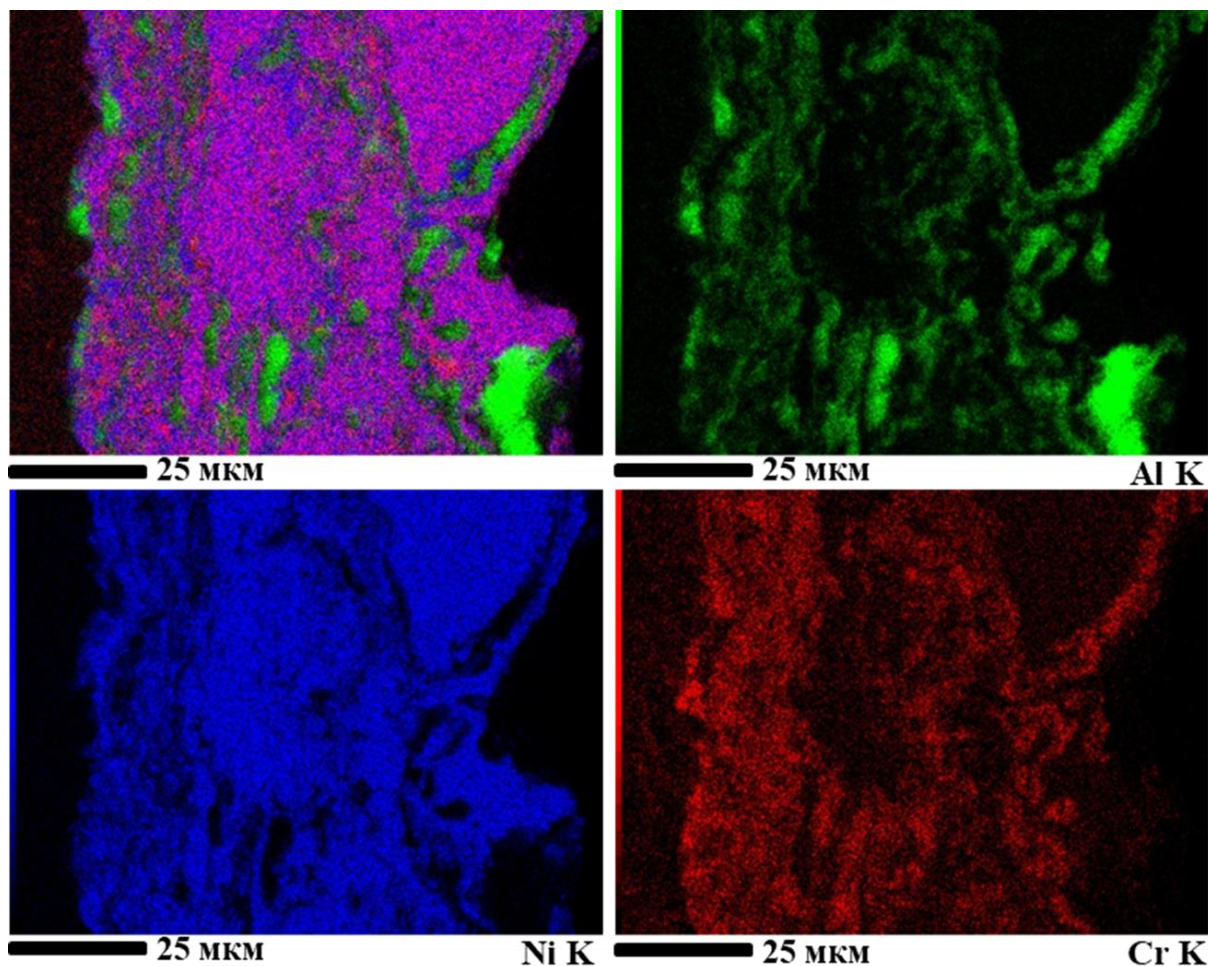
3.11-суретте NiCr-Al(30 %) жабынның көлденең қимасының микроқұрылымы мен элементтік талдау нәтижелері көрсетілген. NiCr-Al(30%) жабынның қалыңдығы шамамен 75мкм, яғни NiCr-Al(20%) жабынымен салыстырғанда төмен. Жабын құрамында Al мөлшерінің көп болуы детонациялық бүрку кезінде жұмсақ матрицаның түзілуіне себеп болып, жабын қалыңдығы сол жұмсақ Al матрицасына орналасқан NiCr бөлшектерінен құралады. 3.11-суреттен төсеніш бетіне жақын қабатта (шамамен 10 мкм, суретте 004 спектіріне сәйкес келетін аймақ) түзілген жабынның құрылымы біркелкі таралған NiCr мен Al композициясынан құралған, яғни детонациялық оқпанды 50 % жарылғыш газбен толтырғанда пайда болатын жарылыс энергиясы жабын компоненттерінің балқуына жеткілікті деңгейде деп тұжырым жасауға болады. Жабынның ортаңғы қабаттарының түзілу барысында детонациялық бүрку энергиясы төмен болғандықтан (детонациялық оқпанды жарылғыш газбен толтыру деңгейі 30-40 %) NiCr бөлшектері толық балқып үлгермей, гетерогенді құрылымды жабын қабаты түзіледі, яғни кейбір аймақтарда NiCr элементінің жоғарғы шоғырлануы байқалады.

3.11-суреттегі NiCr-Al(30 %) жабынның көлденең қимасы бойынша элементтердің сызықтық таралуы графигінен Al концентрациясының басқа жабындармен салыстырмалы түрде жоғары екенін байқауға болады. Al мөлшерінің NiCr-Al(30 %) жабыны бойынша таралуының толықтай кескінін 3.12-суреттегі элементтердің таралу картасынан көруге болады.



Спектр	O, ат. %	Al, ат. %	Cr, ат. %	Fe, ат. %	Ni, ат. %	Жалпы, %
004	39.70	21.04	10.89	1.16	27.22	100.00
005	31.31	34.18	8.68	0.56	25.27	100.00
006	19.65	26.45	15.15	0.76	37.99	100.00

Сурет 3.11 –NiCr-Al(30 %) жабынның көлденең қимасы бойынша элементтердің таралуын зерттеу нәтижесі



Сурет 3.12 – NiCr-Al(30 %) жабынның көлденең қимасы бойынша элементтердің таралу картасы

NiCr-Al(30%) жабынның көлденең қимасы бойынша элементтердің таралу картасынан Al жабынның бетінде ғана емес төсенішке жақын аймақта да жоғарғы мөлшерде кездеседі (3.12-сурет, жасыл кескінді карта), яғни градиентті таралу байқалмайды. Жабын құрамында Al көп мөлшерде болуы детонациялық бүрку кезінде оның тотығуын туғызады. Жоғары температурада жабын ішкі қабаттарында оксидті қосылыстардың түзілуі себебінен деградацияға ұшырауы мүмкін. NiCr-Al(30 %) жабын құрамында оксидті қосылыстың түзілуін 3.6-суретте көрсетілген рентгенфазалық талдау нәтижесі дәлелдейді. Яғни жабын құрамында γ -Al₂O₃ оксидінің болуы жоғарғы температура жағдайында жабын компоненттері арасындағы әртүрлі термиялық ұлғаю коэффициенті әсерінен (мысалы оксидті керамика мен метал компоненті) жабынның бүлінуін тудырады. NiCr-Al(30 %) жабынын құрылымын зерттеу нәтижелері жабын құрамында Al көп мөлшерде болуы градиентті құрылымды, жоғарғы температурада ыстыққа төзімді Ni-Cr-Al жабын алу үшін жарамсыз деген тұжырым жасауға негіз болады.

Сонымен, детонациялық бүрку әдісімен Al әртүрлі массалық үлесінде NiCr-Al негізіндегі градиентті құрылымды қаптаманың қалыптасуын зерттеу бойынша төмендегі кортындылар жасалды:

– Энергодисперстік спектроскопия (EDS) әдісінің әртүрлі тәсілдерін (сызықтық, локалды және карталық таралу) қолданып зерттеу нәтижесі NiCr-Al жабынның құрамын Al 15% мөлшері жоғарғы температурада қолданылатын градиентті құрылымды Ni-Cr-Al қаптама алуға жеткіліксіз деген қорытындыны жасауға негіз бола алады;

– NiCr-Al(30%) жабынның фазалық және химиялық құрамын зерттеу нәтижелері Al көп мөлшерде болуы детонациялық бүрку кезінде жабын құрамында γ -Al₂O₃ оксидінің түзілуіне байланысты жоғарғы температурада ыстыққа төзімді NiCr-Al градиентті қаптама алу үшін жарамсыз деген тұжырым жасауға мүмкіндік береді;

– NiCr-Al(20 %) жабыны бойынша алынған элементтік талдау нәтижелері детонациялық бүрку технологиясының тек бір ғана режимдік параметрін өзгерте отырып (3.2-кестеге сәйкес детонациялық оқпанды жарылғыш газбен толтыру көлемін), химиялық құрамы бойынша градиентті жабын алуға болатынын дәлелдейді;

– детонациялық оқпанды жарылғыш газбен толтыру көлемін 50%-дан 25 %-ға төмендете отырып NiCr-Al(20 %) композициялық ұнтағының қыздыру температурасын өзгертіп, химиялық құрамы бойынша градиентті жабын алуға болады. 3.10-суретке сәйкес детонациялық оқпанды жарылғыш газбен 50% - 40% аралығында толтырып қаптама алғанда болат төсенішінің бетінде жақсы адгезиялық беріктікке ие NiCr негізіндегі жабын қалыптасады. Ал детонациялық оқпанды жарылғыш газбен толтыру деңгейін біртіндеп 25% төмендету қаптаманың беткі қабаттарында Al жоғарғы мөлшерінің қалыптасуына себеп болады. Жабынның беткі қабатында Al жоғары концентрацияда тұтастай таралуы, тотығу кезінде Al₂O₃ оксидті қабаты пайда болып, қаптаманың қорғаныш қасиетін жақсартыды. Ni-Cr-Al негізіндегі градиентті құрылымды детонациялық әдіспен алудың бұл тәсілі бойынша «Функционалды градиентті жабынды алу тәсілі» (07.03.2024, № 8922) атты пайдалы модель бойынша патент алынды [131].

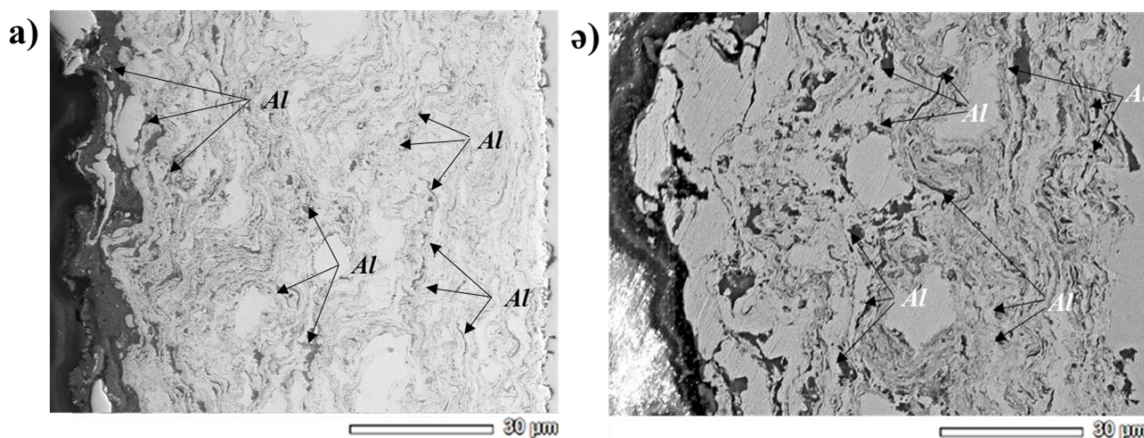
3.3. Детонациялық бүрку әдісімен алынған Ni-Cr-Al негізіндегі біртекті және градиентті қорғаныш қабаттарының қасиеттерін салыстырмалы зерттеу

Детонациялық бүрку кезінде оқпанды жарылғыш газбен толтыру көлемін өзгерту арқылы Ni-Cr-Al негізіндегі градиентті жабындарды алуға болатындығы анықталды [124]. Детонациялық бүрку кезінде жабындардың құрылымы мен фазалық құрылымының қалыптасуын талдау жабынның эксплуатациялық қасиеттерін анықтауға мүмкіндік береді. Жабынның негізгі қасиеттері оның жоғарғы температурада, коррозиялық ортада және үйкеліс пен тозу жағдайында жұмыс жасайтын қондырғыларға қойылатын талаптарды анықтайды. Осыған орай диссертацияда қойылған міндеттердің бірі NiCr-Al(20%) негізінде біртекті және градиентті құрылымда алынған жабындардың қасиеттерін зерттеу болды. NiCr-Al(20%) негізіндегі біртекті және градиентті жабындарды детонациялық бүрку процессінің технологиялық режимдері 3.3-кестеде көрсетілген.

Кесте 3.3 – Детонациялық бүрку әдісімен NiCr-Al(20%) негізіндегі біртекті және градиентті жабындарды алу режимдері

Жабын құрылымы	O ₂ /C ₂ H ₂	Ату арақашықтығы, мм	Оқпанды толтыру көлемі, %	Ату саны
Біртекті	1,856	150	50	40
Градиентті	1,856	150	50	10
			40	10
			30	10
			25	10

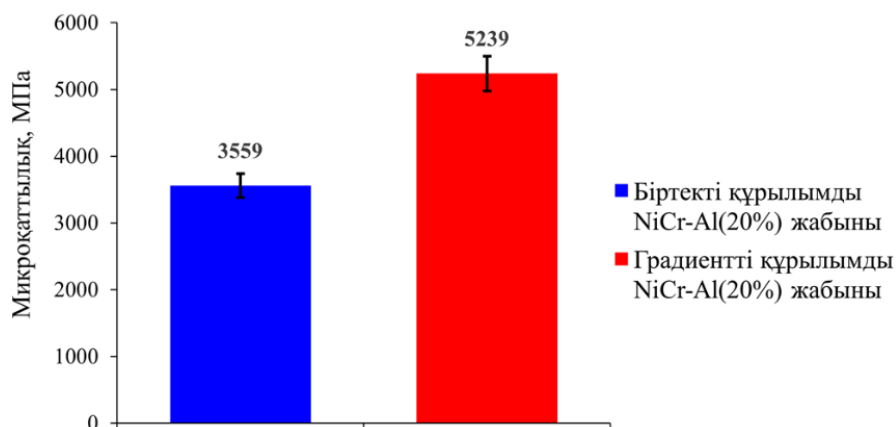
Жабынның механика-трибологиялық және термиялық қасиеттерін анықтайтын негізгі фактор – жабынның құрылымы. 3.13-суретте NiCr-Al(20%) жабынының біртекті және градиентті құрылымының көлденең қима бойынша бейнеленген. Элементтердің таралуы бойынша салыстырмалы түрде біртекті NiCr-Al(20%) композициялық жабынының микроқұрылымында компоненттердің фазалық айырмашылығы айқын байқалады (сурет 3.13ә). Біртекті жабынның беткі қабатының микроқұрылымының тығыздығы салыстырмалы түрде төмен. Детонациялық оқпанды жарылғыш газдармен 50% толтырып алынған жабын құрамнда Al мөлшерінің аз болатыны алдыңғы тарауларда анықталған. Сол себептен CrNi₂ бөлшектерінің арасында балқыған Al элементінің аз болуына байланысты тығыз матрицалы жабын түзілу мүмкіндігі төмендеп, кеуекті құрылымды NiCr-Al(20%) жабыны түзіледі (сурет 3.13ә) және сәйкесінше кеуекті құрылымды жабынның микроқаттылығы төмен болады. Детонациялық жарылыс энергиясын біртіндеп азайта отырып (50% → 25%) алынған жабынның беткі қабатында Al мөлшері көбейе отырып қалыптасатын градиентті жабынның тығыздығы салыстырмалы түрде жоғары (сурет 3.13а).



а) градиентті; ә) біртекті

Сурет 3.13 – NiCr-Al(20%) детонациялық жабындардың көлденең қимасының микроқұрылымы

NiCr-Al(20%) біртекті және градиентті жабындардың микроқаттылығын Виккерс әдісімен өлшеу нәтижелері 3.14-суретте көрсетілген. NiCr-Al(20%) жабынының градиентті құрылымның микроқаттылығы біртекті құрылымды жабынмен салыстырғанда шамамен 30 % жоғары. NiCr-Al(20%) жабынының микроқаттылығының өзгешелігі оның микроқұрылымымен байланысты деген тұжырым жасауға болады.

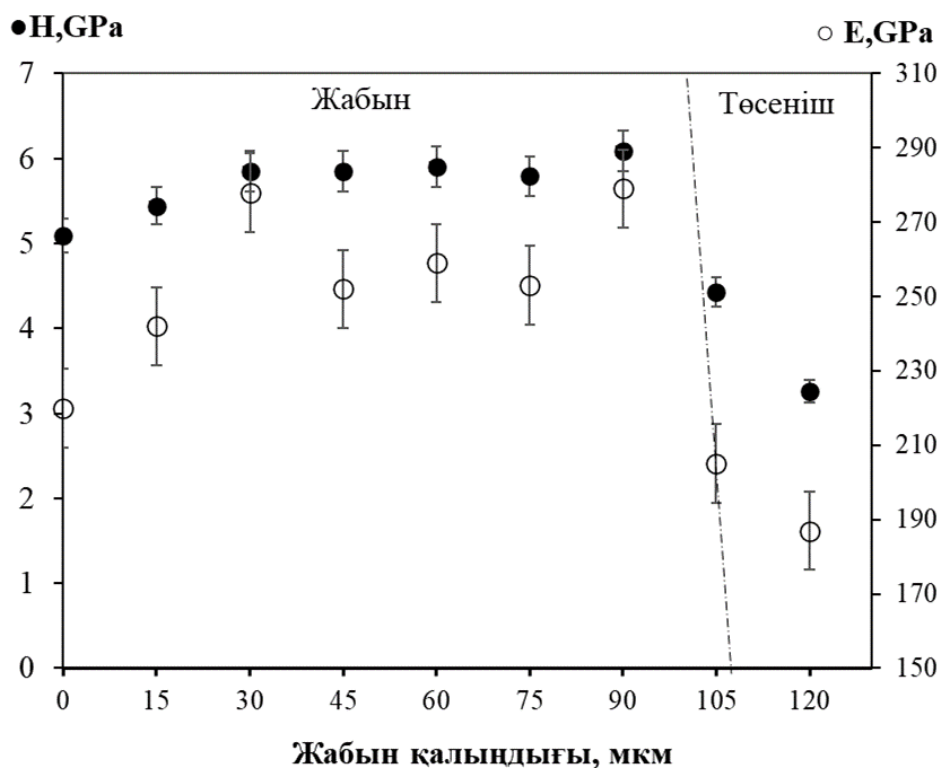


Сурет 3.14 – NiCr-Al(20%) детонациялық жабындарының микроқаттылығы

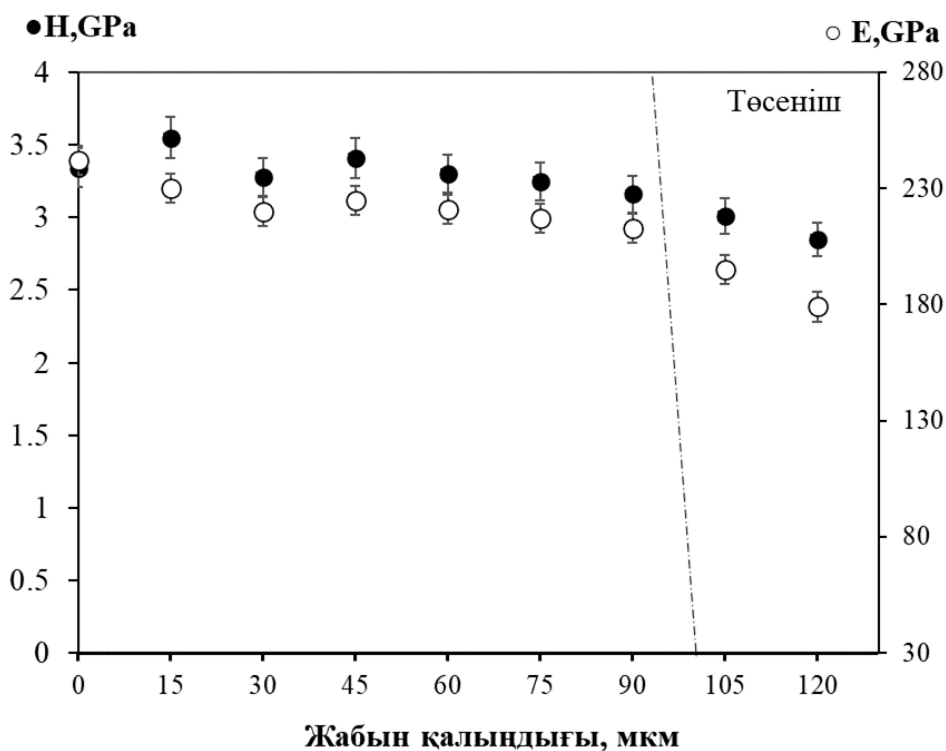
3.15 және 3.16-суреттерде элементтің таралуы бойынша әр түрлі құрылымды NiCr-Al(20%) жабындарының көлденең қимасы бойынша наноқаттылық (Н, ГПа) пен серпімділік модулі (Е, ГПа) мәндері көрсетілген. 3.15-суретте көрсетілген NiCr-Al(20%) жабынының наноқаттылығы мен серпімділік модулінің мәндерінің таралуы элемент бойынша градиентті құрылымға сәйкес келеді. NiCr-Al(20%) жабынның көлденең қимасының микроқұрылымы сәйкес (сурет 3.13а) жабынның беткі аймағында Al көп мөлшерде болуына байланысты қаттылық пен серпімділік модулінің мәндері төмен, ал төсенішке қарай CrNi₂ фазасының көп болуына байланысты олардың мәндері артады. Сонымен қатар жабынмен салыстырғанда төсеніштің серпімділік модулі мен қаттылығы төмен. Анықтамалық деректер бойынша төсеніш ретінде қолданған 12Х1МФ болатының серпімділік модулі шамамен 198 ГПа және қаттылығы 2,8-3,0 ГПа.

3.16-суретте элементтің таралуы бойынша біртекті құрылымды NiCr-Al(20%) жабынын зерттеу нәтижелері көрсетілген. Серпімділік модулі мен қаттылығы шамамен элементтің таралуы бойынша градиентті құрылымды жабынмен салыстырғанда шамамен 2 есе төмен. Бұл нәтижелер Виккерс әдісімен анықталған микроқаттылықтың нәтижелерімен сәйкес келеді (3.14-сурет). Элементтің таралуы бойынша біртекті құрылымды жабынның кеуектілігі градиентті құрылымды жабынмен салыстырғанда жоғары (сурет 3.15ә). Яғни біртекті құрылымды NiCr-Al(20%) жабынының серпімділік модулі мен қаттылығының төмен мәндері жабын кеуектілігінің жоғары болуымен

байланысты. Сонымен қатар жабынның серпімділік модулі мен қаттылығының мәндері жабын қалыңдығы бойынша біркелкі таралған (3.15-сурет).

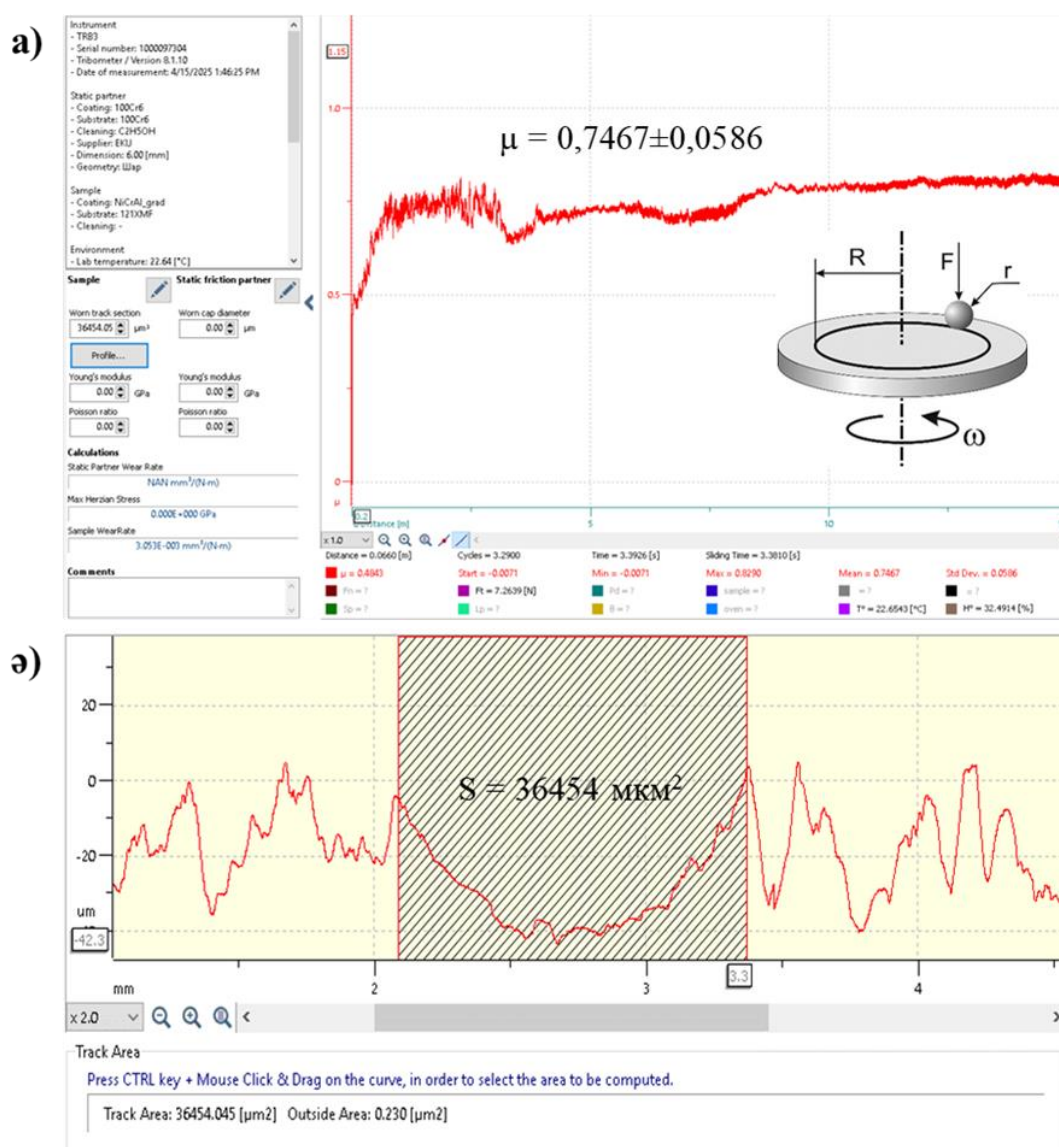


Сурет 3.15 – Элементтің таралуы бойынша градиентті құрылымды NiCr-Al(20%) жабынының қаттылығы мен серпімділік модулі



3.16 сурет - Элементтің таралуы бойынша біртекті құрылымды NiCr-Al(20%) жабынының қаттылығы мен серпімділік модулі

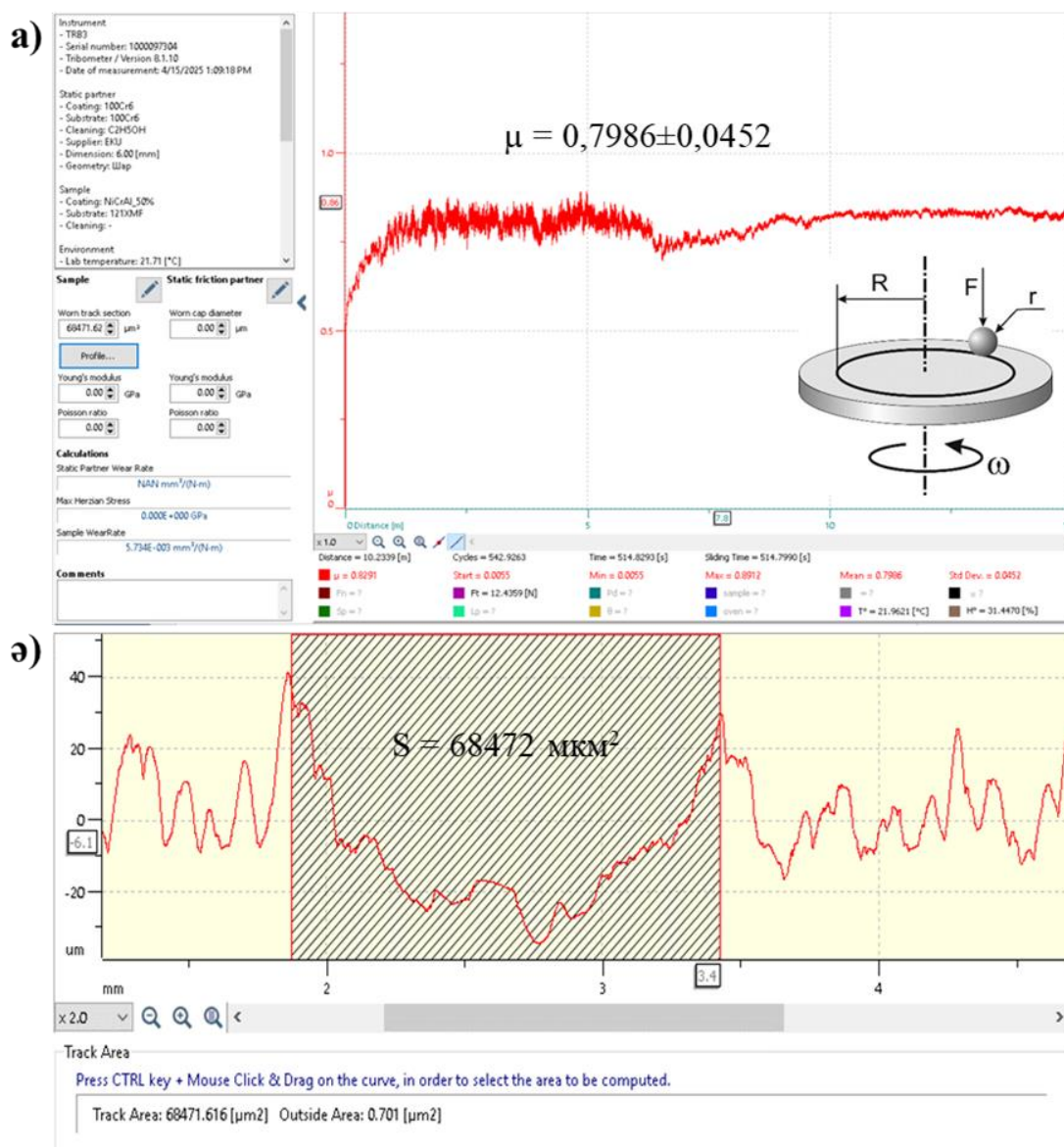
Элементтердің таралуы бойынша градиентті және біртекті құрылымды NiCr-Al(20%) жабынының трибологиялық қасиеттері үйкеліс коэффициенті (μ), мен тозу жылдамдығы (wear rate, W_v , мм³/Н×м) арқылы анықталды. Трибологиялық сынақтар құрғақ үйкеліс жағдайында контрдене ретінде ШХ15 болатынан жасалған шарды қолданып бөлме температурасында жүргізілді. 3.17-суретте градиентті NiCr-Al(20%) жабынын «шар-диск» әдісімен трибологиялық сынау нәтижелері көрсетілген. Графиктен бастапқыда үйкеліс коэффициентінің біршама өзгермелі болғаны байқалады, кейіннен салыстырмалы түрде тұрақты деңгейге жетті. Бұл жабынның градиентті құрылымдық ерекшеліктеріне байланысты болуы мүмкін. NiCr-Al(20%) градиенті жабыны мен ШХ-15 болаты арасындағы үйкеліс сынау нәтижелері: $\mu=0,7467\pm0,0586$; $W_v=3,133\times10^{-3}$ мм³/Н×м.



а) үйкеліс коэффициенті; ә) тозу ауданы

Сурет 3.17 – Градиентті NiCr-Al(20%) жабынын «шар-диск» әдісімен трибологиялық сынау нәтижелері

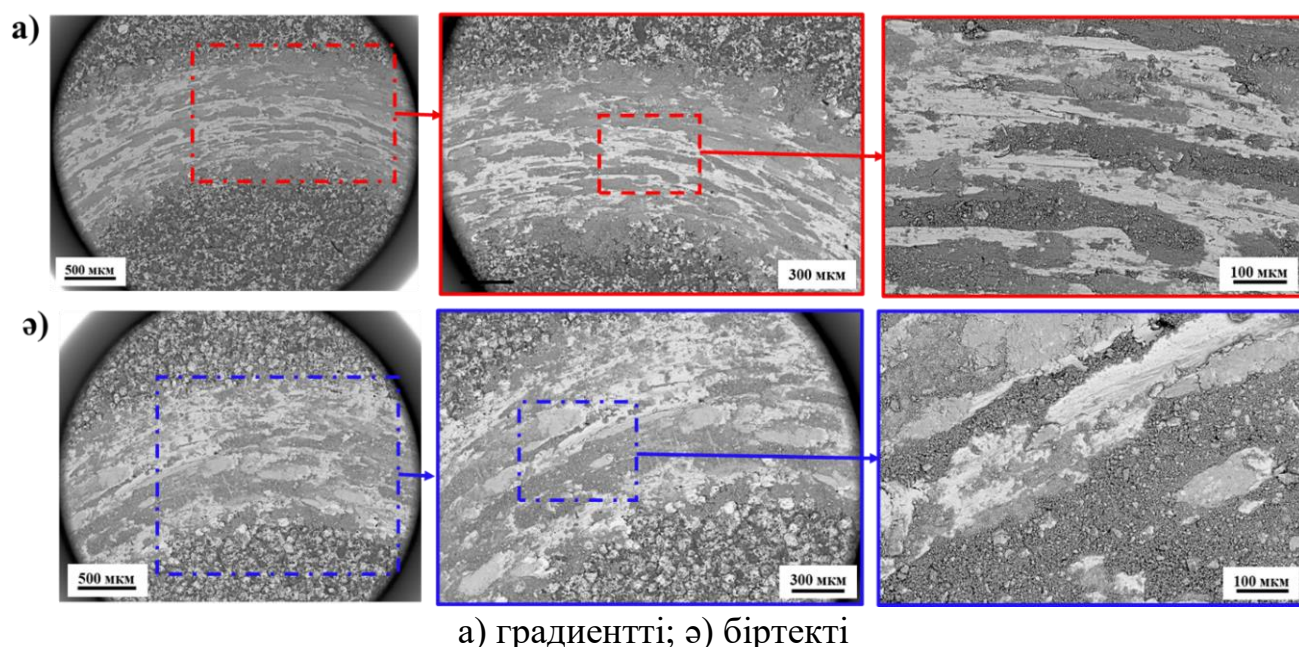
3.18-суретте біртекті NiCr-Al(20%) жабынын трибологиялық сынау нәтижелері көрсетілген: $\mu=0,7986\pm0,0452$; $W_v=5,734\times10^{-3}$ мм³/Н×м. Біртекті жабынның тозу жылдамдығы градиентті жабынмен салыстырғанда шамамен 2 есе жоғары, бірақ үйкеліс коэффициенттерінің мәні бірдей. 3.17ә және 3.18ә-суреттерде трибологиялық сынақтан кейінгі тозу жолының профилі бейнеленген және біртекті жабынның тозу ауданы градиентпен салыстырғанда 2 есе жоғары. Сонымен элементтердің таралуы бойынша градиентті және біртекті құрылымды NiCr-Al(20%) жабынының «шар-диск» әдісімен трибологиялық сынау нәтижелері градиентті құрылымды жабын тозуға төзімділігі жоғары екенін анықтайды.



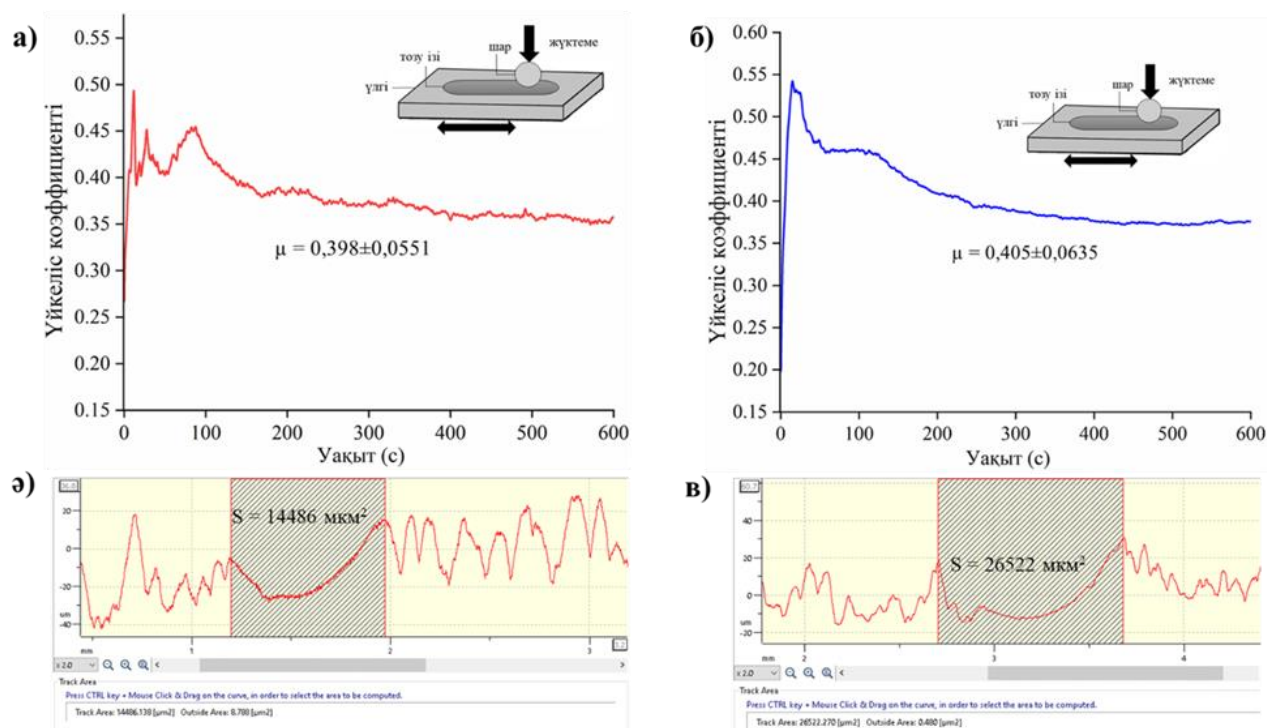
а) үйкеліс коэффициенті; ә) тозу ауданы

Сурет 3.18 – Біртекті NiCr-Al(20%) жабынын «шар-диск» әдісімен трибологиялық сынау нәтижелері

3.19-суретте «шар-диск» әдісімен жүргізілген трибологиялық сынақтан кейінгі NiCr-Al(20%) детонациялық жабындарының тозу іздерінің СЭМ кескіні көрсетілген. Градиентті құрылымды NiCr-Al(20%) жабынының бетінде көп мөлшерде Al болғандықтан (3.9-сурет) иілгіштік қасиетке ие болып, жабын үйкеліс кезіндегі тозу әсерінен шытынау мен жарылуға ұшырамаған (сурет 3.19а). Жүктеменің (трибологиялық сынақта қолданған жүктеме салмағы 1Н) ықпалындағы үйкеліс әсерінен градиентті жабынның беті пластикалық деформацияға көбірек ұшыраған. Ал элементтік құрамы бойынша біртекті құрылымды NiCr-Al(20%) жабынының тозу ізінен микрожарықтар мен кішкентай өлшемді жабын фрагментацияларын көруге болады (сурет 3.19ә). Сонымен трибологиялық сынақтан кейінгі тозу жолының морфологиясына талдау жасай отырып, элементтердің таралуы бойынша градиентті және біртекті құрылымды NiCr-Al(20%) жабындардың үйкеліс коэффициенттерінің мәндері бірдей болғанмен тозу аудандарының әр түрлі екенін түсіндіруге болады. NiCr-Al(20%) біртекті жабынының профилометр көмегімен анықталған тозу ауданы (3.18-сурет), градиентті құрылымды жабынмен салыстырғанда (3.17-сурет) шамамен екі есе жоғары болуы, оның трибологиялық сынақ кезінде микрожарықшақтар әсерінен жабынан микрофрагменттердің ажырауы нәтижесінде болуы мүмкін. NiCr-Al(20%) жабындарын «ілгерінді-кейінді» схема бойынша трибологиялық сынау нәтижелеріде (3.20-сурет) «шар-диск» схема бойынша жүргізілген трибологиялық сынақ нәтижелерін растайды.



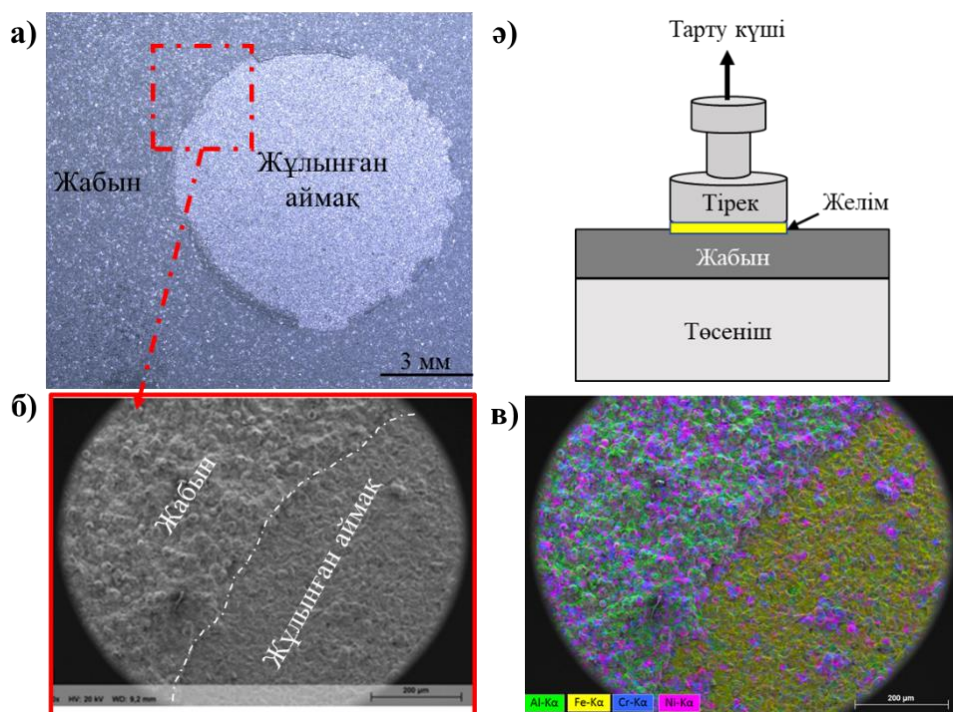
Сурет 3.19 – NiCr-Al(20%) жабындарын трибологиялық сынаудан кейінгі тозу іздерінің морфологиясы



а, ә) градиентті жабынның үйкеліс коэффициенті мен тозу ауданы;
б, в) біртекті жабынның үйкеліс коэффициенті мен тозу ауданы

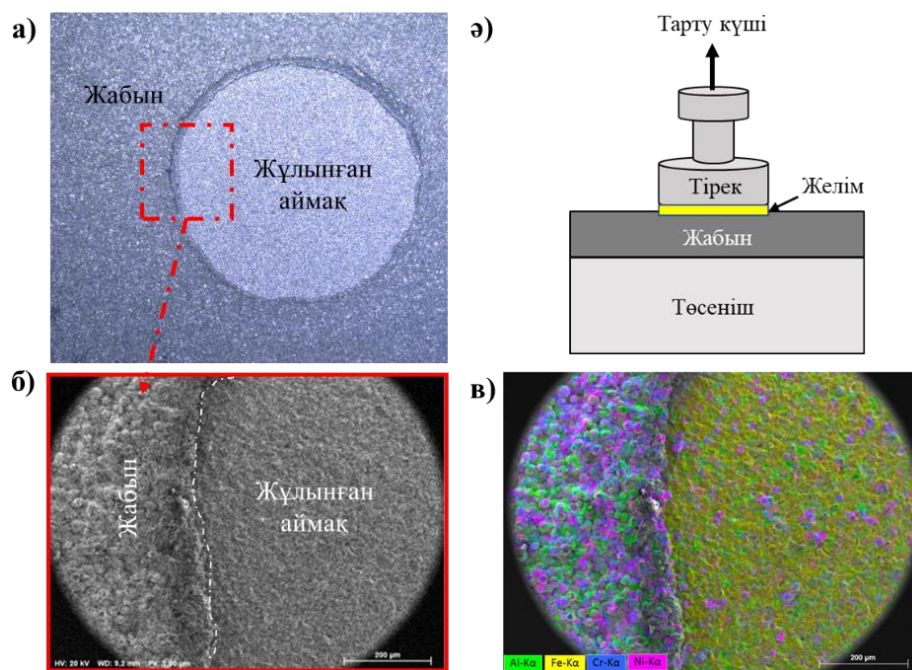
Сурет 3.20 – NiCr-Al(20%) жабындарын «ілгерінді-кейінді» схема бойынша трибологиялық сынау нәтижесі

3.21 және 3.22-суреттерде NiCr-Al(20%) жабындарын адгезиялық беріктікке сынау бойынша мағлұматтар көрсетілген. Жабындардың адгезиялық беріктігі жабын бетіне тіректі желіммен (эпоксид негізіндегі «Epidian 53» желімі беріктігі 70 МПа) жабыстырып, тарту күшімен жұлу арқылы анықталды (3.21ә және 3.22ә-сурет). NiCr-Al(20%) жабындарының бетін адгезиялық беріктікке сынаудан кейінгі (3.21а және 3.22а-сурет) морфологиясын зерттеу нәтижелері жабынның бұзылуы когезиялық емес адгезиялық сипатқа ие екенін көрсетеді. Элементтік талдау нәтижесі жабынның жұлынған аймағы негізінен төсеніштің Fe элементінен тұратынын анықтап, сынақ кезінде жабынның адгезиялық сипатта бұзылуын дәлелдейді (3.21в және 3.22в-сурет). Алайда градиентті жабынның жұлынған аймағының ішінара бөлігінде жабын элементтерінің әліде сақталғанын көруге болады (3.21в-сурет). Бұл элементтік құрамы бойынша әртүрлі NiCr-Al(20%) жабындарын бір-бірімен салыстырғанда градиентті құрылымды жабынның адгезиялық беріктігі біртекті жабынмен салыстырғанда жоғары екенін көрсетеді. NiCr-Al(20%) жабындарының жұлыну күшін өлшеу нәтижелері градиентті құрылымды жабынның адгезиялық беріктігінің орташа мәні $38,77 \pm 6,9$ МПа, ал біртекті құрылымды жабынның беріктігінің орташа мәні $25,43 \pm 3,1$ МПа тең болатыны анықтады.



а) үлгінің суреті; ә) адгезиялық беріктікті сынау схемасы;
б) жабын мен жұлынған аймақ морфологиясы; в) элементтік талдау нәтижесі

Сурет 3.21 – Адгезиялық беріктікке сынаудан кейінгі градиентті құрылымды NiCr-Al(20%) жабыны



а) үлгінің суреті; ә) адгезиялық беріктікті сынау схемасы;
б) жабын мен жұлынған аймақ морфологиясы; в) элементтік талдау нәтижесі

Сурет 3.22 – Адгезиялық беріктікке сынаудан кейінгі біртекті құрылымды NiCr-Al(20%) жабыны

Сонымен, элементтердің таралуы бойынша біртекті және градиентті NiCr-Al(20%) детонациялық жабындарының механикалық және трибологиялық қасиеттерін салыстырмалы зерттеу бойынша төмендегі нәтижелер алынды:

- Виккерс әдісімен өлшенген градиентті құрылымның микроқаттылығы біртекті құрылымды қаптамамен салыстырғанда шамамен 30 % жоғары;

- наноиндентрлеу әдісімен қаптамалардың көлденең қимасы бойынша өлшенген градиентті құрылымды жабынның серпімділік модулі мен наноқаттылықтың шамасы біртекті құрылымды қаптамамен салыстырғанда шамамен 2 есе жоғары;

- «шар-диск» және «ілгерінді-кейінді» схемалар бойынша трибологиялық сынақ нәтижелері градиентті қаптаманың тозу жылдамдығы біртекті жабынмен салыстырғанда шамамен 2 есе төмен екенін анықтады, алайда қаптамалардың ШХ-15 болатымен құрғақ үйкеліс коэффициенті шамамен бірдей мәнге ие;

- жабындарды адгезиялық беріктікке сынау нәтижелері градиентті құрылымды қаптаманың адгезиялық беріктігінің орташа мәні $38,77 \pm 6,9$ МПа, ал біртекті құрылымды жабынның беріктігінің орташа мәні $25,43 \pm 3,1$ МПа тең болатыны анықтады;

- элементтердің таралуы бойынша біртекті және градиентті NiCr-Al(20%) қаптамалардың механика-трибологиялық қасиеттерін бір-бірімен салыстырғандағы айырмашылықтарды жабындардың микроқұрылымдық ерекшеліктерімен түсіндеруге болады. Детонациялық жарылыс энергиясын біртіндеп азайта отырып (50 % → 25 %) градиентті қаптаманың тығыздығы салыстырмалы түрде біртекті жабыннан жоғары.

Бөлім бойынша қорытынды

Диссертацияның үшінші тарауы бойынша жасаған зерттеулер негізінде мынандай қорытынды жасалды:

- арақатынасы $O_2/C_2H_2=1,856$ болатын оттегі-ацетилен қоспасымен детонациялық оқпанды 25 % және 30 % толтыру арқылы алынған қаптаманың фазалық құрамы $CrNi_2$, NiAl және таза Al элементінен тұратыны, ал жарылыс зарядының энергиясын 40 % және 50 % дейін арттырған жағдайда жабын құрамында тек $CrNi_2$ фазасы анықталды. Бұл зерттеулер элементтердің таралуы бойынша градиентті құрылымды қаптама алуға негіз болып саналады;

- детонациялық бүрку әдісімен элементтердің таралуы бойынша градиентті құрылымды Ni-Cr-Al жабынының қалыптасуы Al әр түрлі массалық үлесінде (15%; 20%; 30%) зерттелді. Энергодисперстік спектроскопия (EDS) әдісінің әртүрлі тәсілдерін (сызықтық, локалды және карталық таралу) қолдана отырып жасалған зерттеу нәтижелері Ni-Cr-Al қаптамасының құрамында Al 20% мөлшері элементтік таралуы бойынша градиентті жабын алуға тиімді екені дәлелденді. Детонациялық бүрку технологиясының тек бір ғана режимдік параметрін өзгерте отырып, яғни оқпанды жарылғыш газбен толтыру деңгейін азайта отырып 50% - 40% аралығында болат төсенішінің бетінде жақсы адгезиялық беріктікке ие NiCr негізіндегі қаптама алып, біртіндеп 25% төмендету арқылы жабынның беткі қабаттарында Al жоғарғы мөлшері бар

химиялық құрамы бойынша градиентті жабын алынды. Қаптаманың беткі қабатында Al жоғары концентрацияда тұтастай таралуы, жоғарғы температуралық тотығу кезінде Al_2O_3 оксидті қабаты пайда болуына себеп болып, жабынның қорғаныш қасиетін жақсартады. Детонациялық әдіспен Ni-Cr-Al негізіндегі химиялық құрамы бойынша градиентті құрылымды жабын алудың бұл тәсілі пайдалы модель бойынша патентпен қорғалды (пайдалы модельге патент «Функционалды градиентті жабынды алу әдісі», 07.03.2024, № 8922);

– элементтердің таралуы бойынша градиентті NiCr-Al(20%) қаптамаларының біртекті құрылымды жабынмен салыстырған микроқаттылығы мен адгезиялық беріктігі шамамен 30% жоғары, құрғақ үйеліс кезіндегі тозу жылдамдығы шамамен 2 есе төмен. Химиялық құрамы бойынша градиентті құрылымды NiCr-Al(20%) қаптаманың жоғарғы механика-трибологиялық қасиеттері жабынның микроқұрылымдық ерекшеліктерімен түсіндіріледі, яғни детонациялық жарылыс энергиясын біртіндеп азайта отырып (50% → 25%) алынған градиентті жабынның тығыздығы салыстырмалы түрде біртекті қаптамадан жоғары.

4. ДЕТОНАЦИЯЛЫҚ БҮРКУ ӘДІСІМЕН АЛЫНҒАН Ni-Cr-Al НЕГІЗІНДЕГІ БІРТЕКТІ ЖӘНЕ ГРАДИЕНТТІ ЖАБЫНДАРЫН ЫСТЫҚҚА ТӨЗІМДІЛІККЕ СЫНАУ

Бұл тарауда детонациялық бүрку әдісімен алынған NiCr-Al(20%) біртекті және градиентті жабындардың ыстыққа төзімділігін бағалау мақсатында жоғары температуралы тотығуға, ыстық коррозияға, жоғары температуралық трибологиялық (тозуға) және өндірістік ортада (ЖЭС) сынау зерттеу жұмыстарының нәтижелері көрсетілген. Зерттеу нәтижелері [132-138] ғылыми мақалаларында жаряланған.

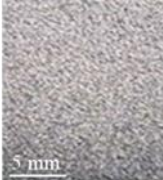
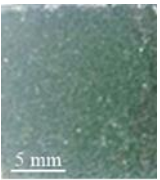
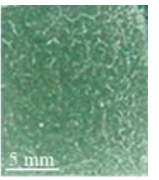
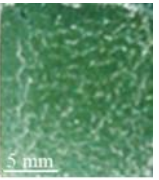
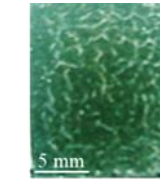
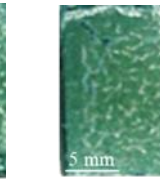
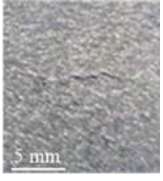
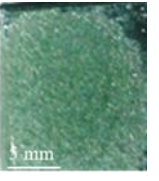
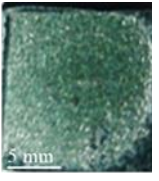
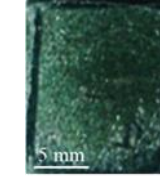
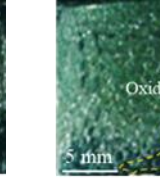
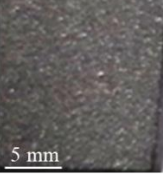
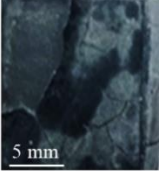
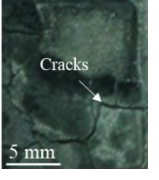
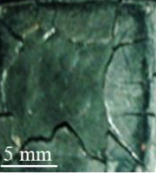
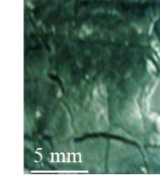
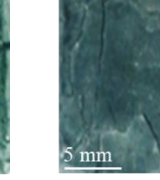
4.1 Жоғары температуралық тотығуға төзімділікке сынаудан кейінгі Ni-Cr-Al негізіндегі біртекті және градиентті қорғаныш қабаттарын зерттеу

Жоғары температуралық тотығу сынағына дейін, NiCr-Al(20%) біртекті және градиентті жабындарының кеуектілігі анықталды. Өлшеу нәтижесінде градиентті жабынның кеуектілігі шамамен <1 %, ал біртекті жабынның кеуектілігі шамамен 2,22 % деңгейінде болды. Жоғары температуралы тотығу сынағы SNOL 7.2/1100 пешінде қалыпты атмосфералық қысым жағдайында 1000°C температурада жүргізілді. Сынаққа үш түрлі үлгілер дайындалды: NiCr-Al(20%) біртекті және градиентті детонациялық жабындары бар үлгілер және төсеніш ретінде қолданылған 12X1МФ ыстыққа төзімді болат. Әрбір үлгінің өлшемі 15×15×3 мм болды, ал NiCr-Al(20%) жабындары үлгінің барлық алты бетіне алынды. Үлгілер пеште 1 сағат бойы қыздырылып, содан кейін 20 минут бойы ауада салқындатылды. Бұл процесс бір толық цикл ретінде есептелді. Жалпы, әр үлгіге 50 цикл сынақ жүргізілді. Әрбір үлгінің массасы сынақ басталғанға дейін және әр циклден кейін өлшеніп, тотығу нәтижесінде болған массалық өзгерістер тіркеліп отырды. Сонымен қатар үлгілердің беттік өзгерісін бақылау мақсатында әр циклден кейін үлгілер суретке түсіріліп отырды.

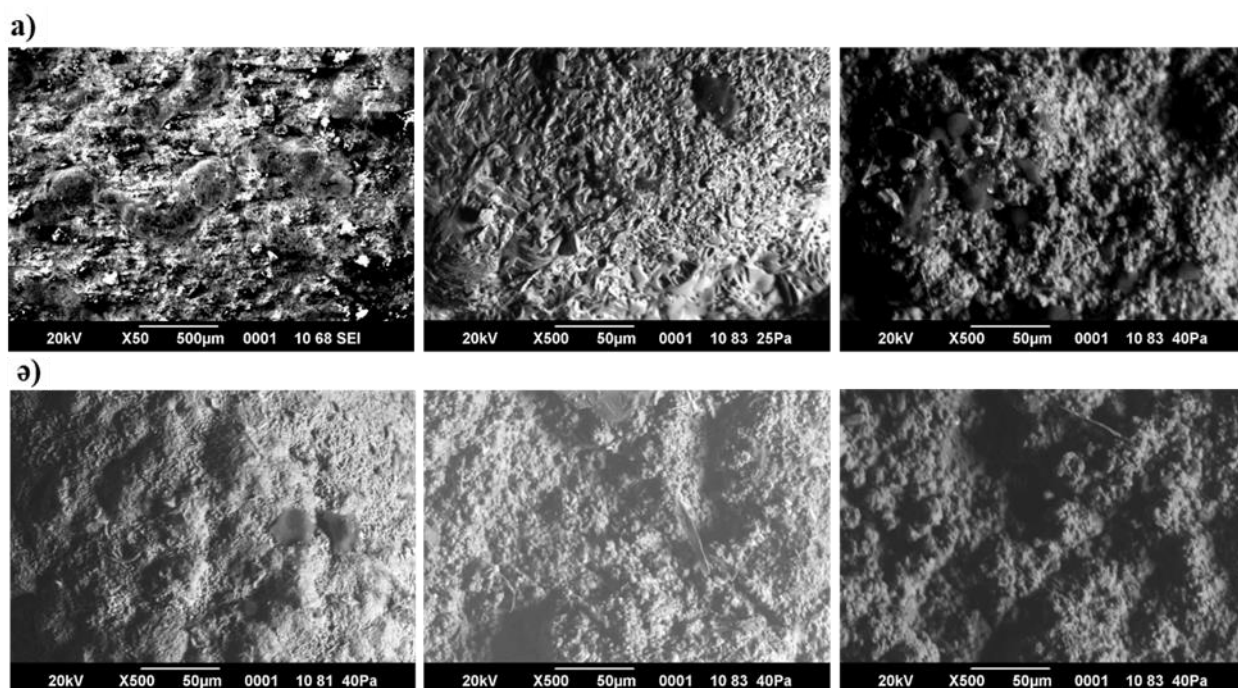
4.1-кестеде 1000°C температурада жүргізілген жоғары температуралы циклдік тотығу сынағына дейін және әртүрлі циклдерден (10, 20, 30, 40, 50) кейінгі үлгілердің беткі суреттері көрсетілген. Сынаққа дейін NiCr-Al(20%) біртекті жабынымен қапталған үлгінің беті тегіс әрі сұр түсті болса, ал NiCr-Al(20%) градиентті жабынымен қапталған үлгінің беті кедір-бұдырлы және қара сұр түсті болды. Жоғары температуралы сынаудың бірінші циклінен кейін біртекті NiCr-Al(20%) жабынының түсі сұрдан қою сұр түске өзгеріп, бұл түс 10-шы циклге дейін сақталды. 20-шы циклден кейін жабынның бетінде ұсақ көпіршіктер байқалды, ал 50-ші циклде үлгінің шеттерінде оксид қабаттары қалыптасты. Градиентті NiCr-Al(20%) жабынымен қапталған үлгі алғашқы циклден кейін түсін өзгертпеді, тек үлгінің бір бұрышында қара оксид қабаттары пайда болды. Бұл оксид қабаттарының көлемі 50-ші циклге дейін біртіндеп ұлғайды. Сонымен қатар, градиентті жабын 20-шы циклден кейін сұр-жасыл реңкке ие болды. Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, сынақ барысында біртекті және градиентті NiCr-Al(20%) жабындарымен қапталған үлгілердің беткі құрылымдары айтарлықтай бұзылмаған. Ал 12X1МФ болаты әр цикл сайын жарықшақтанып, қабыршақтана бастады. Кестедегі әр он циклден кейінгі суреттен, болаттың жарықшақ пен қабыршақтану салдарынан, беткі қабатының

катты бүлінгенін көруге болады. Осы талдау нәтижесінде, NiCr-Al(20%) қорғаныш жабындарының жоғары температурада жұмыс жасайтын бөлшектердің бетіне алудың маңыздылығын көрсетуге болады.

Кесте 4.1- Жоғары температуралы циклдік тотығу сынақтарына дейінгі және әр он циклдан кейінгі үлгілердің беттік өзгерістері

Үлгі аты	1000°C температурада сынаудан кейінгі өзгерістер					
	сынауға дейін	10 циклден кейін	20 циклден кейін	30 циклден кейін	40 циклден кейін	50 циклден кейін
Біртекті NiCr-Al(20%) жабыны						
Градиентті NiCr-Al(20%) жабыны						
12X1МФ болаты						

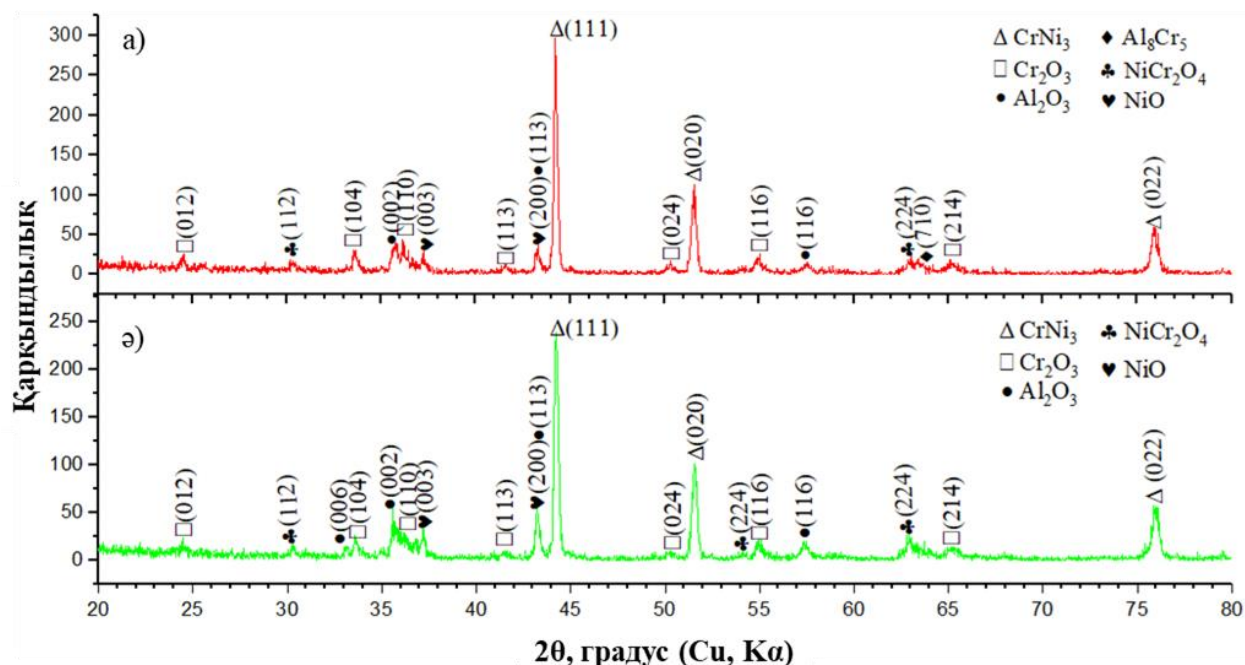
Жоғары температуралы циклдік тотығу сынауынан кейінгі (50 цикл) біртекті және градиентті NiCr-Al(20%) жабындарының әртүрлі аймақтарынан түсірілген беткі морфологиясының СЭМ суреттері 4.1-суретте көрсетілген. Жоғары температуралық тотығудан кейін біртекті NiCr-Al(20%) жабыны бетінде (4.1a-сурет) тотығу нәтижесінде пайда болған оксидті қабаттар мен шағын көлемді көпіршіктер байқалады. Ал градиентті құрылымды NiCr-Al(20%) жабынның (4.1b-сурет) беткі құрылымы біртекті жабынмен салыстырғанда біршама жақсы сақталған. Жекелеген аймақтарда тотығудың белгілері анықталғанымен, жалпы жабын қабаты біртекті жабынға қарағанда берік екені байқалады.



а) біртекті; ә) градиентті

Сурет 4.1 – Жоғары температуралы циклдік тотығудан кейінгі NiCr-Al (20%) жабындардың беткі СЭМ суреттері.

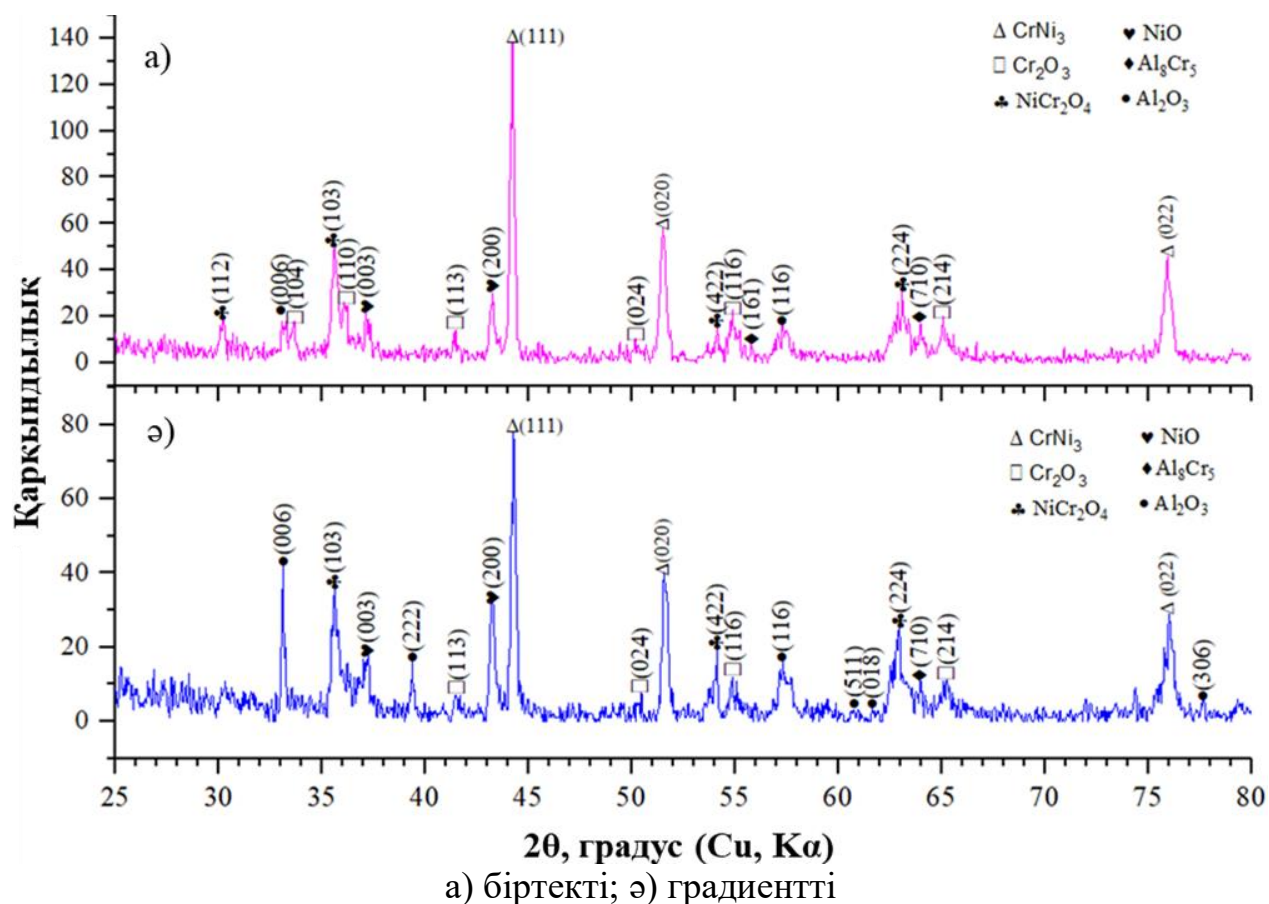
Жүргізілген жоғары темепературалы тотығу сынақтарында 25 және 50 циклдан соң NiCr-Al(20%) жабындарына рентген фазалық талдау зерттеу жұмыстары жүргізілді. 4.2-суретте NiCr-Al(20%) жабындарымен қапталған үлгілердің жоғары температуралы 25 циклдік тотығу сынақтарынан кейінгі рентгендік фазалық талдау нәтижесі көрсетілген. Біртекті NiCr-Al(20%) жабыны бетінде (сурет 4.2а) 25 циклдік сынақтан кейін CrNi_2 , Cr_2O_3 , Al_2O_3 , Al_8Cr_5 , NiCr_2O_4 және NiO фазалары түзілген. Ал градиентті NiCr-Al(20%) жабыны бетінде (сурет 4.2ә) Al_8Cr_5 интерметаллииді фазасынан басқа біртекті жабын бетінде түзілген фазалар түзілген. Жабын бетінде түзілген Al_2O_3 қорғаныш оксиді фазасы жабын бетіне жақын орналасқан алюминийдің ауадағы оттегімен әрекеттесуінен түзілді. Ал Cr_2O_3 және NiO фазалары Al_2O_3 қабатының өсуі баяулағаннан кейін беткі қабатта қалыптасады. NiCr_2O_4 шпинель фазасы Al_2O_3 (немесе Cr_2O_3) және NiO арасындағы қатты фазалық реакциялар нәтижесінде түзіледі.



а) біртекті; ә) градиентті

Сурет 4.2 – NiCr-Al (20%) жабындарын жоғары температуралы циклдік сынаудың 25 циклынан кейінгі рентген фазалық талдау нәтижелері.

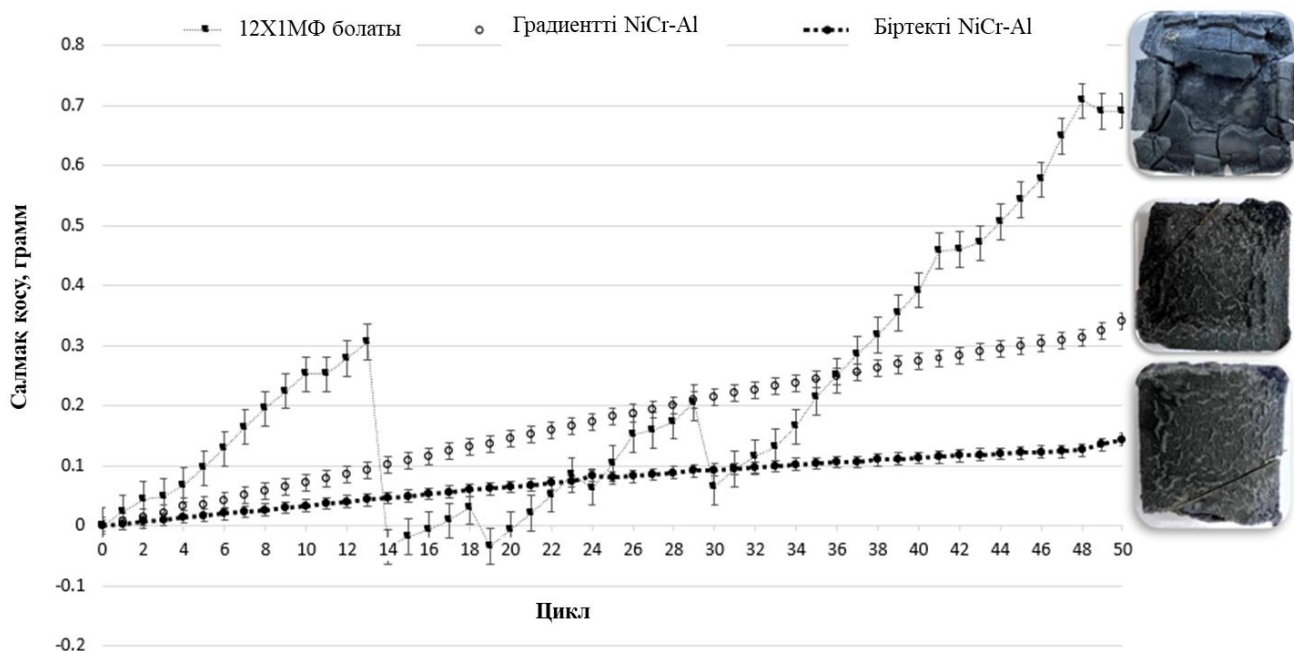
Біртекті және градиентті NiCr-Al(20%) жабындарымен қапталған үлгілердің жоғары температуралы 50 циклдік тотығу сынақтарынан кейінгі рентгендік фазалық талдау нәтижесі 4.3-суретте көрсетілген. Екі жабын беттерінде де CrNi_2 , Cr_2O_3 , Al_2O_3 , Al_8Cr_5 , NiCr_2O_4 және NiO фазалары түзілген. Жоғары температуралы циклдік тотығу сынақтарына дейін NiCr-Al(20%) біртекті жабыны CrNi_2 фазасынан, ал NiCr-Al(20%) градиентті жабыны CrNi_2 , Al фазаларынан тұрды [124]. Жоғары температуралық тотығуға сынаудан кейін екі жабын беттерінде Cr_2O_3 және Al_2O_3 сияқты қорғаныс оксидтері түзілген. Алайда, градиентті NiCr-Al(20%) жабыны бетінде жоғары температуралық тотығу сынағынан кейін Al_2O_3 фазасының біртектімен салыстырғанда көбірек түзілгенін көруге болады. NiCr-Al(20%) жабылған үлгілер 20 циклден кейін сұр-жасыл түске ие болуы (кесте 4.1) Cr_2O_3 түзілуіне байланысты болуы мүмкін. Жалпы жабын бетінде түзілетін шпинельдерге байланысты қарама қайшы көзқарастар бар, кей зерттеулерде жоғары температура да түзілетін жабын бетіндегі өтпелі оксидтер, шпинельдер Al_2O_3 қорғаныш оксидімен бірге жабын бетінің тотығуға төзімділігін арттырады деп көрсетілген. Алайда жабын беттерін жоғары температуралы тотығудан қорғайтын негізгі оксидтер бұл Al_2O_3 және Cr_2O_3 фазалары болып табылады.



Сурет 4.3 – NiCr-Al (20%) жабындарын жоғары температуралы циклдік сынаудың 50 циклынан кейінгі рентген фазалық талдау нәтижелері.

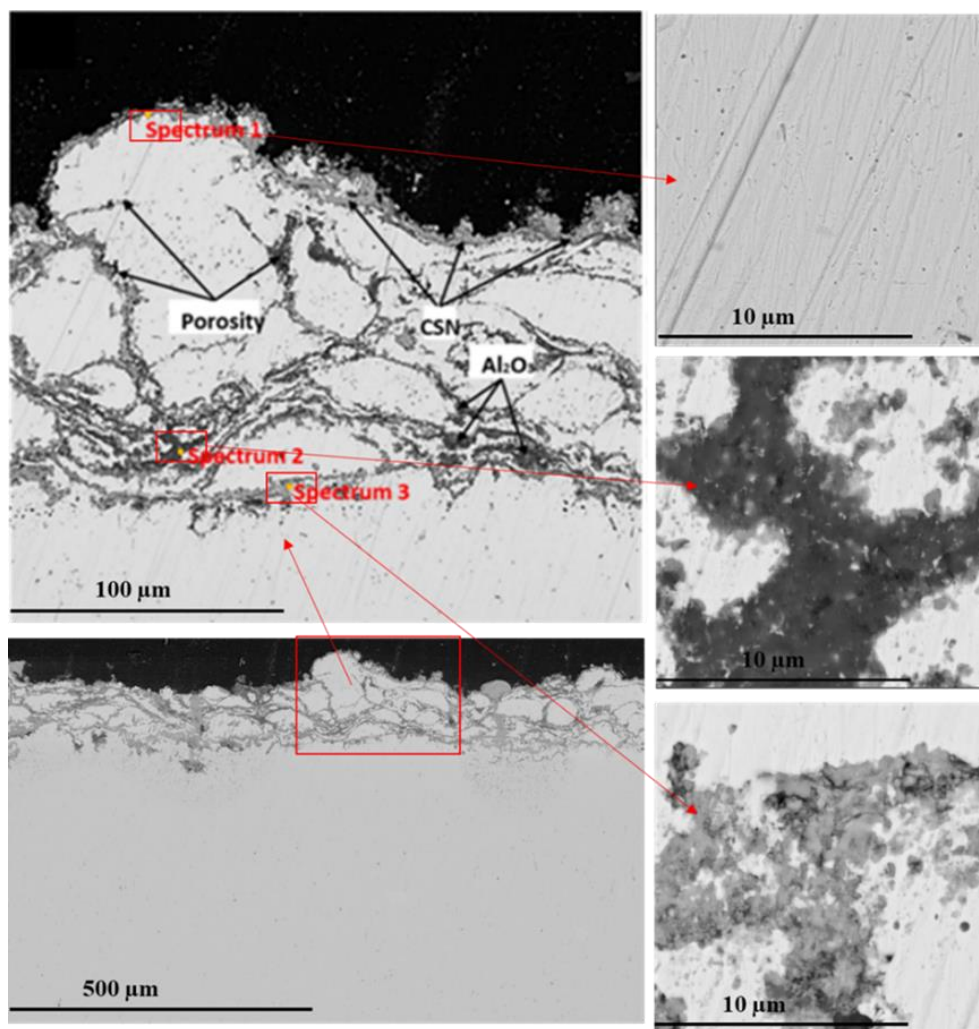
4.4-суретте жоғары температуралы циклдік тотығуға сынақтар нәтижесінде жабынсыз 12Х1МФ болаты және NiCr-Al(20%) біртекті және градиентті жабындарымен қапталған үлгілердің салмағының өзгеру графигі көрсетілген. Жабынсыз 12Х1МФ болаты үшін тотығу және массаның ұлғаю процесі үздіксіз және айтарлықтай болды. Үлгінің шеттері мен бұрыштарында шытынаулар байқалды, ал 14-ші, 18-ші, 24-ші, 28-ші циклдарда үлгі қабыршақтанып, түсе бастады, бұл салмақтың кенеттен төмендеуіне әкелді. 32-ші циклден кейін массаның өсуі қайта байқалды 50-ші циклге қарай салмақтың артуы 0.7 граммнан асты. Бұл болат бетінде үнемі жаңа оксидтердің түзілуі мен ескі қабықтың түсуінен кейінгі қайта тотығу үрдісімен байланысты. Визуалды түрде бұл үлгінің бетіндегі терең жарылу, ірі фрагменттермен тотығу қабықшаларының түсуімен және құрылымның нашарлауымен көрінеді. Біртекті NiCr-Al(20%) жабынды үлгінің массасы 2-ші циклдан бастап баяу өсе бастады. Бұл жабында массаның өсуі 50-ші циклге дейін тұрақты және бірқалыпты болды. Жабынның массасының бұлай өзгеруі жабын бетінде түзілген Al_2O_3 оксид қабатының тотығу процесін баяулатады деп түсіндіріледі. Сонымен қатар жабын бетінде алюминий мөлшерінің азаюына байланысты жабын бетінде жеңіл оксидтердің (CSN) түзілуі де массаның баяу өсуіне әсер етеді. Визуалды бақылау кезінде бұл үлгіде жарылу мен қақырау белгілері болғанымен, салыстырмалы түрде аз екені байқалады. NiCr-Al(20%) градиентті жабыны бар үлгінің салмағы жоғары

температуралы тотығу сынағы барысында 2-ші циклдан бастап біртекті жабынға қарағанда жоғары және қарқынды өсті. Бұл NiCr-Al(20%) градиентті жабындары бар үлгілердің бетінде алюминий оксиді де, жеңіл аралас Cr_2O_3 , NiCr_2O_4 , NiO оксидтері де біртекті жабынмен салыстырғанда көптеп түзілуі салмақтың артуына әкеледі және де рентгендік фазалық талдау нәтижелерімен расталады (4.3-сурет). Жоғарыда көрсетілген оксидтер беткі қабатта тығыз, адгезиясы жоғары және жылу цикліне төзімді қабат қалыптастырады, соның арқасында жабын толық тотығуға дейін бұзылмай, біртекті қорғау қабілетін сақтап қалды.



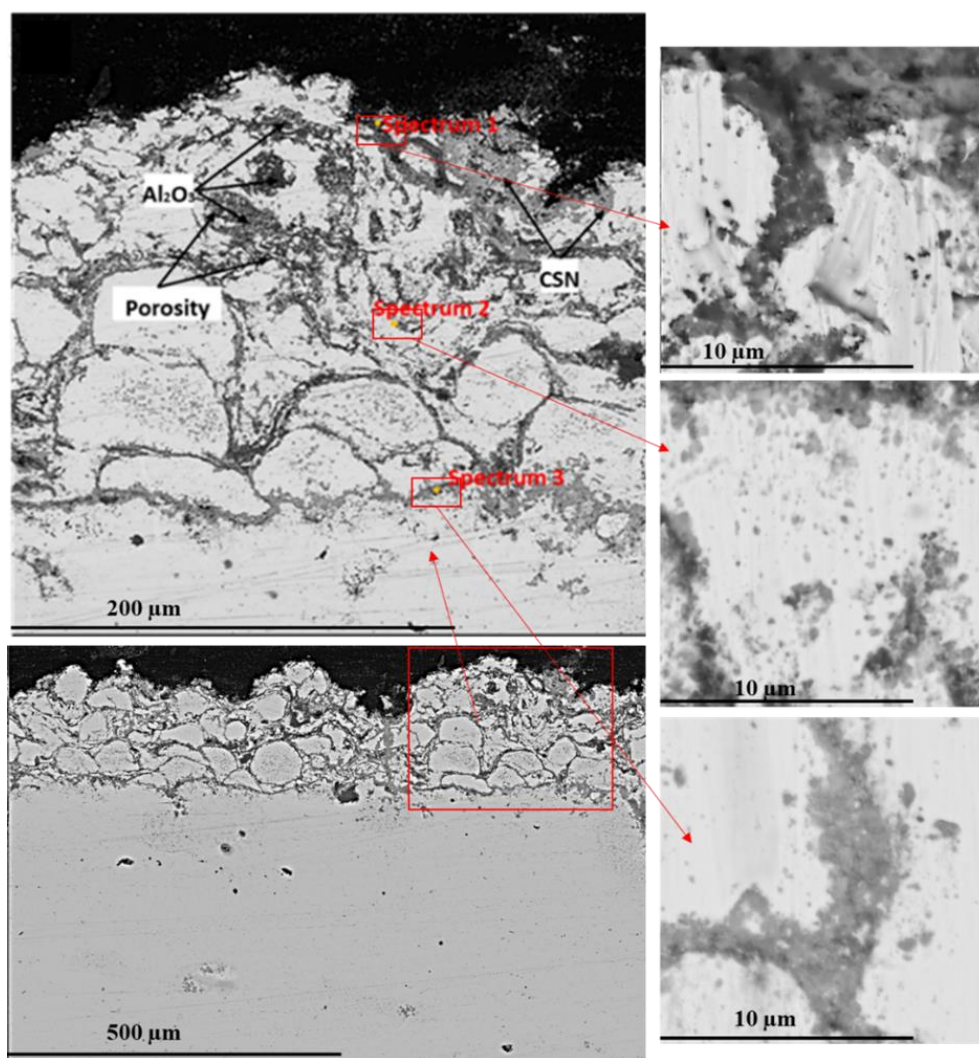
Сурет 4.4 – Жоғары температуралы циклдік тотығу сынағы барысында үлгілердің массалық өзгерісі

Жоғары температуралы циклдік тотығу сынақтарынан кейін жабындардың микроқұрылымы зерттелді. 4.5-суретте біртекті NiCr-Al(20%) жабынының микроқұрылымы көрсетілген. Жоғары температуралық тотығуға дейін жабынның қалыңдығы 90мкм болған, ал 50 циклдік жоғары температуралық тотығудан кейін жабынның қалыңдығы 140мкм-ге дейін артқан. Жабын қалыңдығының бұлай ұлғаюы жабында түзілген оксид қабаттарының өсуімен байланысты. Жоғары температуралық тотығу сынағынан кейін жабында жарықтар мен қабыршақтану байқалмаған, бұл жабынның жоғары температураға тұрақты екенін көрсетеді. Жабынның кеуектілігі төмен (шамамен 2.22%), бұл оның қорғаныштық қасиеттерінің жақсы екенін дәлелдейді. Суретте кеуекті және оксидті аймақтар көрсетілген. Қою сұр аймақтар Al_2O_3 фазасына, ал ашық сұр түстер CSN сияқты басқа оксидтерге сәйкес келеді. Жабынның бетінде шамамен 8мкм қалыңдықтағы CSN қабаты түзілген. Бұл қабат рентгендік фазалық талдау нәтижелеріне сәйкес келеді (4.3-сурет).



Сурет 4.5 – NiCr-Al(20%) біртекті жабынының жоғары температуралы тотығу сынақтарынан кейінгі көлденең қимадағы СЭМ суреті.

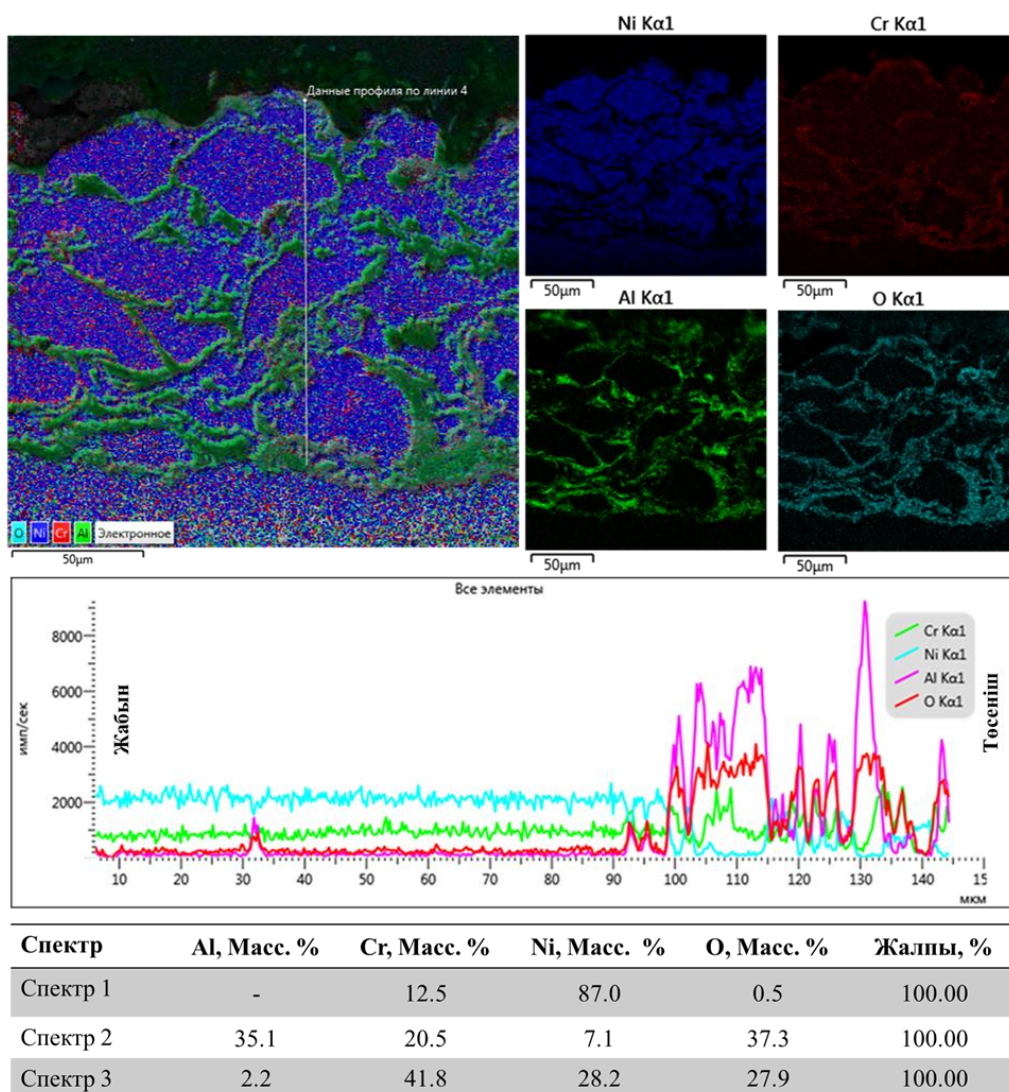
Градиентті NiCr-Al(20%) жабынының жоғары температуралық тотығудан кейінгі микроқұрылымы 4.6-суретте көрсетілген. Сынаққа дейін жабынның қалыңдығы 110мкм болды [124]. 50 сағаттық жоғары температуралық циклдік тотығудан кейін жабынның қалыңдығы 160мкм-ге дейін артқан. Жабын қалыңдығының бұлай өсуі тотығу кезінде түзілген оксид қабаттарының түзілуімен байланысты. Жабынның жарықшақтану мен қабыршақтануға ұшырамауы оның термиялық тұрақты екенін дәлелдейді. Жабынның кеуектілігі өте төмен шамамен 1%, бұл жабынның қорғаныс қасиеттерінің жақсы екенін көрсетеді. Суретте бағыттауышпен кеуекті және оксидті аймақтар анық көрсетілген. Жабынның бетінде CSN қабатының түзілуі байқалады. Сонымен қатар, беткі аймақта Al_2O_3 қорғаныш оксидінің көп мөлшерде түзілгені анық байқалады. Бұл оксид жабынның тотығуға төзімділігін қамтамасыз ететін негізгі оксид болып табылады. Спектр аймақтарында оксидтердің микроқұрылымдары айқын көрсетілген.



Сурет 4.6 – NiCr-Al(20%) градиентті жабынының жоғары температуралы тотығу сынақтарынан кейінгі көлденең қимадағы СЭМ суреті.

Жоғары температуралы циклдік тотығу сынақтарынан кейін NiCr-Al(20%) біртекті және градиентті жабындарына EDS талдау зерттеу жұмыстары жүргізілді. 4.7-суретте біртекті NiCr-Al(20%) жабынының нәтижелері көрсетілген. Суреттегі элементтік карта мен сызықты сканерлеу нәтижелеріне сәйкес, NiCr-Al(20%) жабынында алюминийдің таралуы төсенішке қарай басымырақ, ал жабын бетіндегі концентрациясы едәуір төмендеген. Сызықты сканерлеу нәтижесі бойынша, алюминийдің ең жоғары концентрациясы жабын мен төсеніш арасындағы интерфейс аумағында байқалады (100мкм-ден төмен). Жабынның беткі қабатында (100-140мкм аралығында) алюминий мөлшері айтарлықтай төмендеген. Жабынның беткі қабатында оттегінің концентрациясы жоғары, бұл жерде NiCr_2O_4 , Cr_2O_3 және NiO сияқты оттегінің бай оксидтерінің түзілуін көрсетеді. Алюминийдің жетіспеушілігі жабынның бетінде Al_2O_3 фазасының түзілуін шектеген. Ал хром және никель элементтері төсеніштен жабын бетіне қарай салыстырмалы түрде біркелкі таралған. Жоғары температуралық тотығу кезінде Ni және Cr элементтері тұрақты түрде сақталған. Жалпы жабынның беткі қабатын тұрақтандыру үшін, алюминийдің жеткілікті

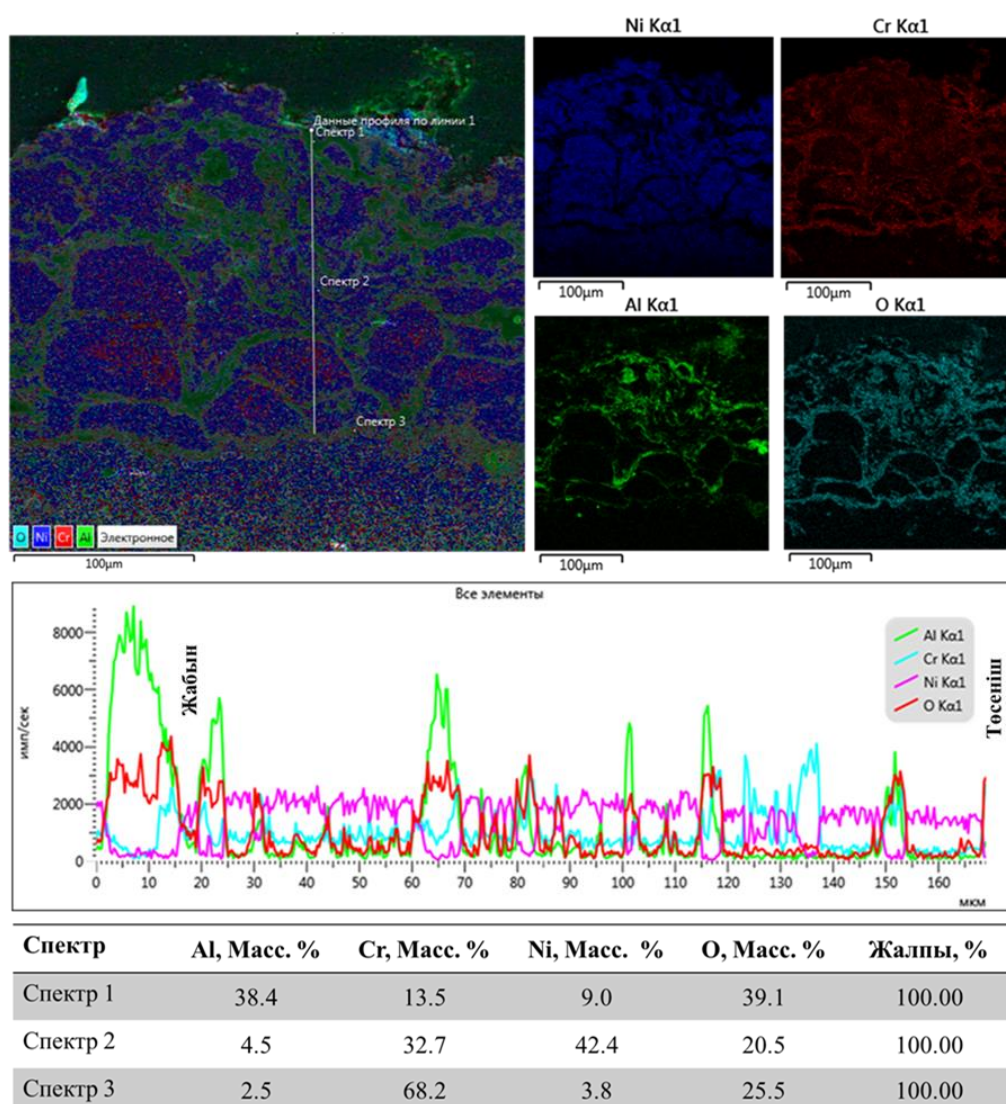
мөлшерін қамамасыз ету маңызды, себебі Al_2O_3 фазасы жоғары температуралық тотығу кезінде ең тиімді қорғаныс қабаты болып табылады. Спектрлік талдау нәтижесі бойынша NiCr-Al(20%) біртекті жабынының 1-спектрінде Al мөлшері анықталмады, ал Ni және Cr элементтерінің мөлшері сәйкесінше 87 және 12,5 мас. % құрады. Бұл жабынның сыртқы оксидті қабаты негізінен CSN фазасынан құралатынын көрсетеді, бұл мәлімет рентген фазалық талдау нәтижелерімен расталады (4.3-сурет). 2-спектр аймағында 35,1 мас.% алюминийдің бар екені анықталды, бұл жабынның ішкі тотығуына ықпал ететін факторлардың бірі болып табылады.



Сурет 4.7 –Жоғары температуралы тотығу сынақтарынан кейінгі біртекті NiCr-Al(20%) жабынының EDS талдауы нәтижелері

Жоғары температуралы циклдік тотығу сынақтарынан кейінгі NiCr-Al(20%) градиентті жабынының EDS талдау зерттеу нәтижелері 4.8-суретте көрсетілген. Карталық талдау бойынша алюминийдің таралуы төсеніштен жабын бетіне қарай артатындығы, яғни градиентті таралғаны анық байқалады. Суреттегі сызықты сканерлеу нәтижесі бойынша, Al концентрациясы жабынның

терең қабаттарында (төсенішке жақын) төмен, ал жабын бетіне қарай (100мкм-ден кейін) біртіндеп артып, жоғары концентрацияға жетеді. Бұл жоғары температуралық тотығу процесі кезінде жабын бетінде көп мөлшердегі Al_2O_3 қорғаныш қабатының түзілгеніне ықпал ететінін көрсетеді. Жабынның беткі қабатында оттегінің мөлшері жоғары, бұл Cr_2O_3 сияқты қорғаныш оксидін де түзуге мүмкіндік берген. NiCr-Al(20%) градиентті жабынында 1-спектрдегі Al мөлшері 38 мас.% құрады. Бұл жоғары мөлшер жабынның бетінде Al_2O_3 қорғаныс фазасының қарқынды түзілуіне ықпал етеді. Al_2O_3 фазасы өзінің жоғары термиялық тұрақтылығы мен тамаша тотығуға төзімді қасиеттеріне байланысты NiCr-Al(20%) жабындары үшін ең тиімді қорғаныс қабаты болып табылады. Сонымен қатар, градиентті жабынның 2 және 3-спектрлерінде Cr мөлшері біртекті жабынға қарағанда жоғары екені анықталды. Хромның жоғары мөлшері интерфейсте материал фазалары арасындағы диффузия процесін баяулатуы мүмкін. Бұл құбылыс градиентті жабынның құрылымдық тұтастығын сақтап, оның тотығуға төзімділігін арттыруға ықпал етеді.



Сурет 4.8 – Жоғары температуралы тотығу сынақтарынан кейінгі градиентті NiCr-Al(20%) жабынының EDS талдауы нәтижелері

Осылайша, жан жақтылы зерттелген жоғары температуралық циклдік тотығу сынақтарының нәтижелері NiCr-Al(20%) біртекті және градиентті жабындарының тотығуға төзімділігіне алюминийдің таралу сипатының елеулі әсер ететінін көрсетті. Атап айтқанда, градиентті құрылымдағы NiCr-Al(20%) жабынында алюминийдің төсеніштен жабын бетіне қарай біртіндеп арта таралуы жабын бетінде Al_2O_3 қорғаныш қабатын қарқынды түзетіні анықталды. Сонымен қатар ортаңғы қабаттарда Cr_2O_3 оксидінің түзілуі, жабынның құрылымдық тұтастығын қамтамасыз етіп, тотығу процессінің терең қабаттарға енуін тежеді. Біртекті жабынмен салыстырғанда, градиентті құрылымдағы NiCr-Al(20%) жабынында Al_2O_3 фазасының түзілуі айқынырақ болғандықтан, бұл жабын жоғары температуралық тотығуға анағұрлым төзімді екенін дәлеледейді.

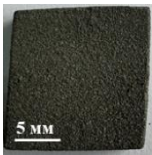
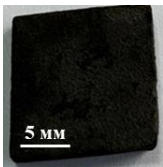
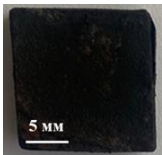
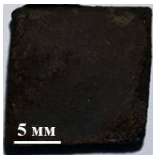
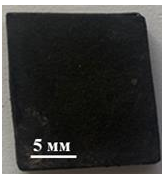
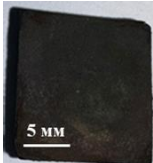
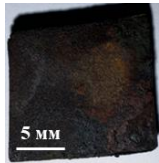
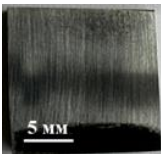
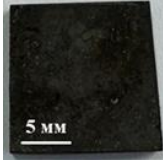
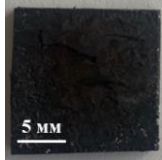
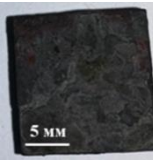
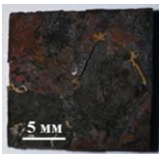
4.2 Ыстық коррозияға сынаудан кейінгі Ni-Cr-Al негізіндегі біртекті және градиентті қорғаныш қабаттарын зерттеу

Ыстық коррозияға сынау жүргізілмес бұрын, біртекті және градиентті NiCr-Al(20%) жабындарының бастапқы салмағы өлшеніп, беті суретке түсірілді. Сынақтар SNOL 7.2/1100 муфельді пешінде жасалды. Ыстық коррозия сынағы $700^{\circ}C$ температурада, атмосфералық қысымда, статикалық ауада жүзеге асырылды. Сынақ басталар алдында үлгілердің бетіне Na_2SO_4 (75%) / NaCl (25%) тұзды қоспасы біркелкі етіп жағылды. Сынақ 18 цикл бойы жүргізілді, әрбір цикл келесі сатылардан тұрды: үлгілер $700^{\circ}C$ температурада 1 сағат бойы ұсталынды; 20 минут бойы ауада табиғи жолмен салқындатылды, үлгілер ультрадыбыстық ваннада дистилденген суда жуылып, кептірілген соң олардың салмағы қайта өлшенді және беті суретке түсірілді.

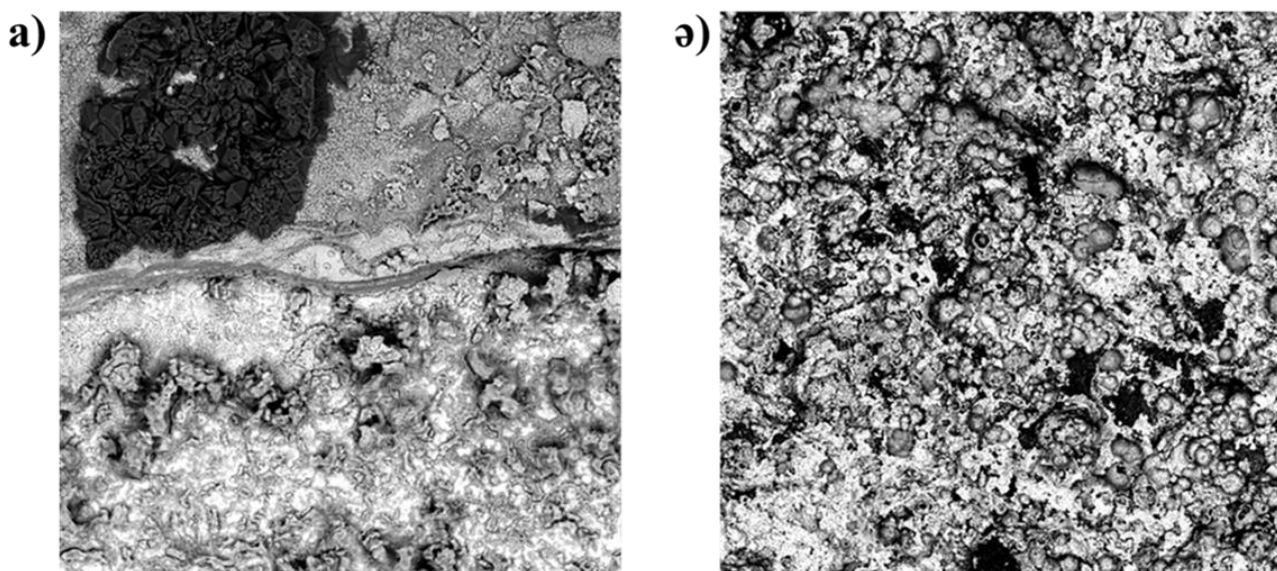
4.2-кестеде ыстық коррозияға ұшыраған 12X1МФ болат төсеніші, сондай-ақ NiCr-Al(20%) біртекті және градиентті жабындарымен қапталған үлгілердің 1, 5, 10 және 15 циклдан кейінгі беткі өзгерістерінің суреттері көрсетілген. Жабынсыз 12X1МФ төсеніш болаты алғашқы 1 циклдан кейін беткі қабатта коррозиялық зақымдану байқалмайды, бірақ түсі күңгірттене бастаған. Ал коррозиялық белгі 5 циклдан кейін айқын көріне бастайды, үлгінің бетінде қызыл түсті тотығу іздері және ұсақ жарықтар байқалады. Беткі қабатта зақымдану мен қабыршақтану 10 циклдан кейін орын алды, үлгі бетінде қоңыр-қызыл түсті коррозияға ұшырау белгілері анық көрінеді. 15 циклдан кейін үлгінің беті қатты коррозияға ұшырап, терең жарықтар мен қабыршақтану белгілері пайда болды. NiCr-Al(20%) біртекті жабыны бетінде 1 циклдан кейін коррозия белгілері байқалмады. Жабын бетінде аздаған түсті өзгерістер 5 циклдан кейін пайда болғанымен, беткі құрылымы тұрақты. Ыстық коррозияға сынаудың 10-шы циклынан кейін жабын бетінде жеңіл коррозия іздері байқалады, бірақ жабынның тұтастығы бұзылмаған. 15 цикл сынаудан кейін жабын шеттері қабыршақтанып, төсеніштен ажырап басталды және бұл ажырау белгілі дәрежеге жеткен кезде (18-цикл) ыстық коррозияға сынау процессі тоқтатылды. NiCr-Al(20%) градиентті жабыны ыстық коррозияға сынақтың бірінші циклынан кейін беткі қабаты толықтай сақталған, ешқандай коррозия белгілері жоқ. Градиентті жабынның беткі түстерінің өзгеріссіз қалуы 5-циклдан кейінде байқалды. Жабын бетінің жеңіл түсті өзгерістері 10-шы циклда

байқалып, коррозия белгілері көріне бастады. Алайда біртекті жабынмен салыстырғанда жақсы шыдамдылық көрсетті. Жалпы жабындардың төсеніштен ажырауы байқалған сәтте 18 циклдан кейін ыстық коррозияға сынау процесі тоқтатылды.

Кесте 4.3 – $\text{Na}_2\text{SO}_4/\text{NaCl}$ ортасында ыстық коррозияға ұшырауға дейінгі және кейінгі үлгілердің беткі морфологиясы

Үлгі аты	700°C температурада сынаудан кейінгі өзгерістер				
	сынауға дейін	1 циклден кейін	5 циклден кейін	10 циклден кейін	15 циклден кейін
Біртекті NiCr-Al(20%) жабыны					
Градиентті NiCr-Al(20%) жабыны					
12X1МФ болаты					

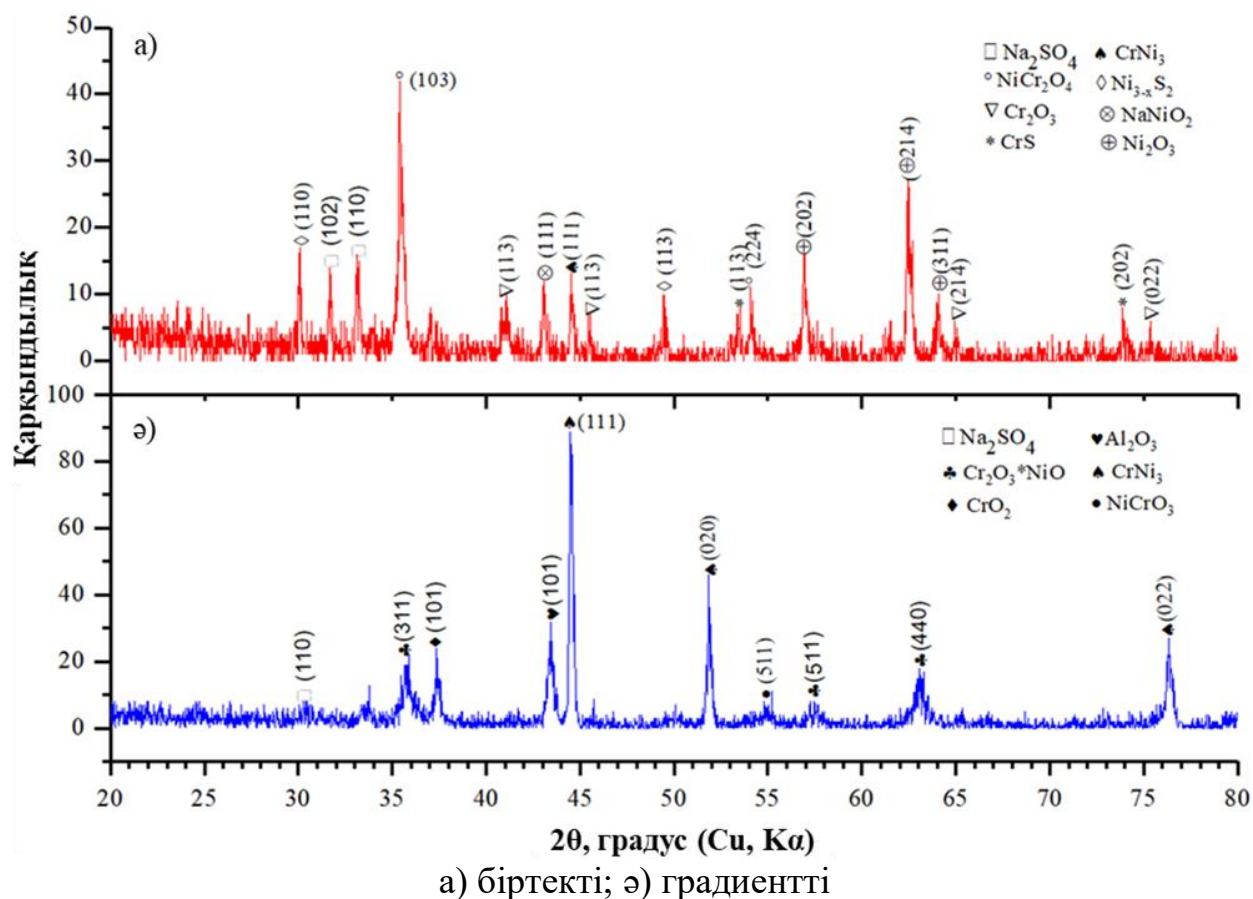
Ыстық коррозияға ұшыраған біртекті және градиентті NiCr-Al(20%) детонациялық жабындарының беттік морфологиясы 4.9-суретте көрсетілген. NiCr-Al(20%) біртекті детонациялық жабын беті (сурет 4.9а) ыстық коррозияға сыналғаннан кейін тұздардың агрессивті әсерінен едәуір бұзылып, қуыстар мен қабаттардың ажырау белгілері байқалды. Ал NiCr-Al(20%) градиентті жабынында (сурет 4.9ә) беткі тұрақтылықтың және де кейбір аймақтарында оксид қабаттарының сақталғаны байқалады. Сондай-ақ, градиентті жабындардың кей аймақтарында бұзылу белгілері болғанына қарамастан, коррозиялық процесстердің қарқыны біртекті жабынға қарағанда әлде қайда төмен болғандығы анықталды. Бұл градиентті жабынның құрамдық ерекшеліктеріне байланысты.



а) біртекті; ә) градиентті

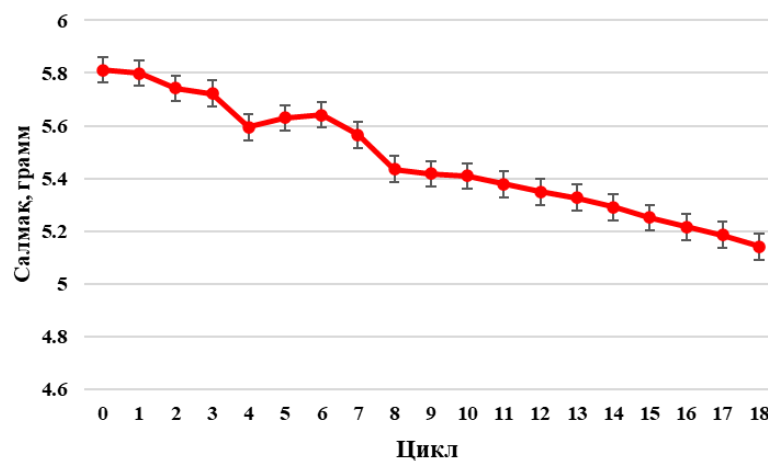
Сурет 4.9 – Ыстық коррозияға ұшыраған NiCr-Al(20%) детонациялық жабындарының беткі морфологиясы

Рентген фазалық талдау әдісімен $\text{Na}_2\text{SO}_4/\text{NaCl}$ агрессивті тұздарда ыстық коррозияға ұшырағаннан кейін біртекті (сурет 4.10а) және градиентті (сурет 4.10b) NiCr-Al(20%) жабындарындағы фазалық өзгерістер анықталды. Ыстық коррозияға дейін біртекті NiCr-Al(20%) жабын CrNi_2 фазасынан тұрса, градиентті NiCr-Al(20%) жабын CrNi_2 , Al фазаларынан тұрды [124]. Ыстық коррозиядан кейін екі жабында да жаңа $\text{Ni}_{3-x}\text{S}_2$, NiCr_2O_4 , NaNiO_2 және CrS фазаларының пайда болғаны анықталған, бұл тотығу және сульфидтену процестерін, әсіресе хромның әсерін көрсетеді. Біртекті NiCr-Al(20%) жабынында натрий негізіндегі фазалардың, әсіресе NaNiO_2 , қарқындылығының жоғары болуы жабынның деградацияға тезірек ұшырауын білдіреді. Ал градиентті NiCr-Al(20%) жабынында CrNi_2 , NiCrO_3 , Cr_2O_3 және Al_2O_3 сияқты тұрақты фазалар байқалды, бұл фазалар жоғары термокоррозияға төзімділікті қамтамасыз етеді.

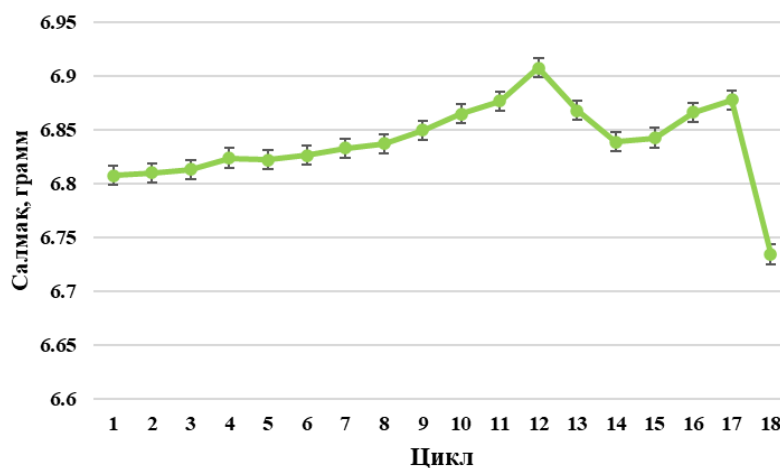


Сурет 4.10 – NiCr-Al(20%) жабындарының ыстық коррозияға ұшырағаннан кейінгі рентген фазалық талдау нәтижесі

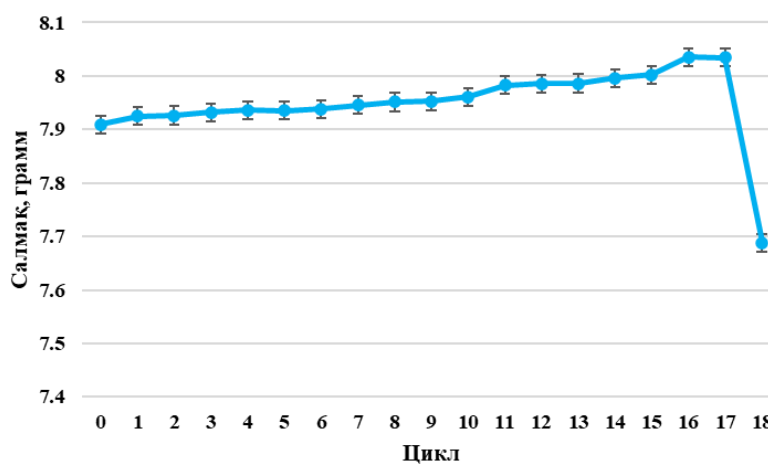
Коррозиялық процестің қарқындылығын бағалаудың негізгі көрсеткіштерінің бірі бұл салмақ өзгерісі. Ыстық коррозияға сынау барысында үлгілердің салмақ өзгерістері есептелді. 12Х1МФ болатының нәтижесі 4.11-суретте көрсетілген. Суреттен болаттың үздіксіз және айтарлықтай салмақ жоғалтқаны байқалады. Мұның себебі, ыстық ортада болат бетінде темір және хром негізіндегі оксидтер түзіледі, бірақ олар тығыз әрі қорғаныш қабат түзбейді. Коррозия өнімдері ұнтақталып түсе бастайды, нәтижесінде үлгінің массасы тұрақты түрде төмендеп отырады. Ыстық коррозияға сынаудан кейінгі біртекті және градиентті NiCr-Al(20%) жабындарының салмақ өзгерістері 4.12 және 4.13-суреттерінде көрсетілген. Графиктен жабынның салмағы біртіндеп арта отырып, соңғы циклдарда күрт төмендегенін көруге болады. Салмақтың мұндай өзгеріске ұшырауының басты себебі, алғашқы циклдарда массаның артуы қорғаныш оксид қабаттары (Al_2O_3 , Cr_2O_3) белсенді түрде түзілуімен байланысты. Алайда белгілі бір уақтан немесе циклдан соң оксид қабаттары жарылып, қабыршақтанып түсе бастаған, бұл массаның төмендеуіне әкелді. Градиентті NiCr-Al(20%) жабыны мен салыстырғанда біртекті NiCr-Al(20%) жабынымен қапталған үлгі салмағы 12 циклдан бастап түсе бастаған. Бұл біртекті NiCr-Al(20%) жабынының градиентті NiCr-Al(20%) жабынымен салыстырғанда қорғаныс қабілетінің төменірек екенін көрсетеді.



Сурет 4.11 – Ыстық коррозияға сынаудан кейінгі 12Х1МФ болатының салмақ нәтижесі



Сурет 4.12 – Ыстық коррозияға сынаудан кейінгі біртекті NiCr-Al(20%) жабынының салмақ нәтижесі



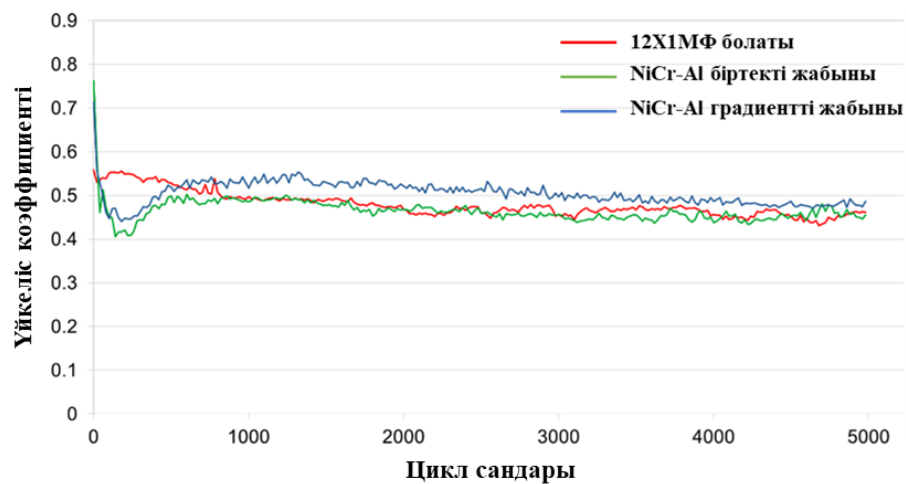
Сурет 4.13 – Ыстық коррозияға сынаудан кейінгі градиентті NiCr-Al(20%) жабынының салмақ нәтижесі

Осылайша, ыстық коррозияға сынау нәтижелері жабындардың коррозияға төзімділігі мен механикалық тұрақтылығына тұзды орта мен температуралық циклдердің елеулі әсер ететінін көрсетті. 700°C температурада $\text{Na}_2\text{SO}_4/\text{NaCl}$ негізіндегі тұзды ортада жүргізілген сынақтар барысында біртекті және градиентті NiCr-Al(20%) жабындары әртүрлі деңгейде коррозиялық өзгерістерге ұшырады. Градиентті жабын белгілі бір циклдар бойы жақсы термиялық тұрақтылық көрсеткенімен, ұзақ мерзімді әсер ету нәтижесінде оның құрылымдық тұтастығы бұзылып, қабаттардың бөлінуіне әкеледі, дегенмен біртекті жабынмен салыстырғанда градиентті жабын коррозияға төзімдірек екені байқалды.

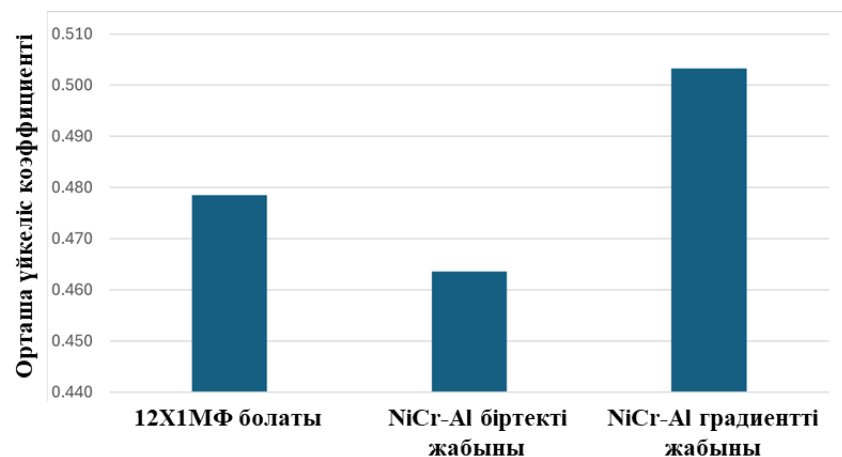
4.3. Жоғары температуралық трибологиялық сынаудан кейінгі Ni-Cr-Al негізіндегі біртекті және градиентті қорғаныш қабаттарын зерттеу

Жоғары температуралық трибологиялық сынау АГН Ғылым және Технологиялар университетінің «Механикалық конструкциялар және теротехнология» кафедрасында жасалды (Польша, Вроцлав). Жоғары температуралық трибологиялық сынақ үшін Польшадағы Радом қаласындағы Пайдалану технологиясы институтында жасалған Т-21 модельді триботестері қолданылған және трибологиялық сынақ ISO 20808:2016 стандартына сәйкес жүргізілген.

4.14-суретте үлгілердің үйкеліс коэффициентінің 0-5000 цикл арасындағы өзгерісі көрсетілген. Алғашқы циклдерде барлық үлгілерде үйкеліс коэффициентінің бастапқы тұрақсыз ауытқуы байқалады, алайда одан кейін мәндері салыстырмалы түрде тұрақталады. 12Х1МФ болатының үйкеліс коэффициенті бастапқыда жоғары болғанымен, мөлшермен 500 циклдан кейін тұрақталып, жалпы мәні ≈ 0.475 деңгейінде болды. Бұл болаттың үйкеліс кезінде беткі оксид қабаттарының пайда болуымен түсіндіріледі. Біртекті NiCr-Al(20%) жабыны ең төменгі үйкеліс коэффициенті мәнін көрсетті (≈ 0.465). Ал градиентті NiCr-Al(20%) жабынының үйкеліс коэффициенті біртекті жабынға қарағанда жоғарырақ болғанымен (0.505), бұл жабын құрылымы бойынша біршама артықшылықтарға ие. Градиентті NiCr-Al(20%) жабынындағы тереңдік бойынша құрылымдық ауысулар (жабын бетінде көбірек алюминий, ал төсенішке жақын Cr мен Ni көп мөлшерінің шоғырлануы) термиялық тұрақтылықты арттырып, ал жабын бетінде түзілетін кешенді оксидті қабаттар (Al_2O_3 , Cr_2O_3 , NiCr_2O_4 , NiO) трибологиялық жұмыс кезінде жоғары қорғаныштық қасиет көрсетеді. 4.15-суретте үлгілердің орташа үйкеліс коэффициенті салыстырмалы түрде берілген.



Сурет 4.14 – Барлық үлгілер үшін үйкеліс коэффициентінің цикл санына байланысты өзгерісі



Сурет 4.15 – Үйкеліс коэффициентінің орташа мәні

Жоғары температуралық трибологиялық сынаудан кейін үлгілердің беткі профильдері байланыссыз интерферометриялық ProFilm 3D профилометрі көмегімен өлшенді. Үлгілердің көлемдік тозу көрсеткіші (1)-формула бойынша анықталды:

$$W_v = \frac{V}{F_n \cdot s} \left[\frac{mm^3}{N \cdot m} \right] \quad (1)$$

Мұнда:

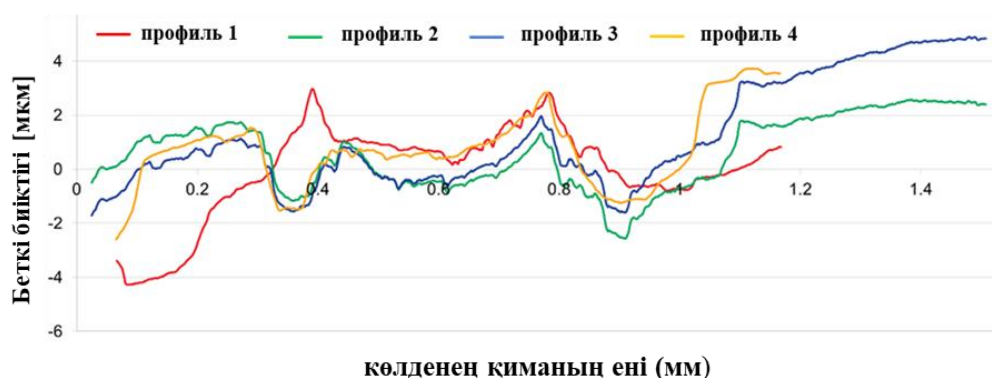
V – тозған материалдың көлемі [mm^3],

F_n – үлгіге түсірілетін қалыпты күш [N],

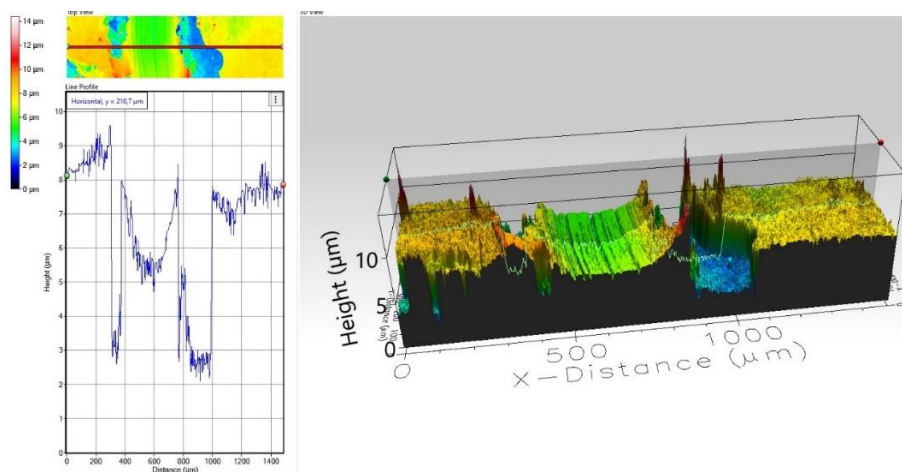
s – үйкеліс жолы [m].

Тозған материалдың көлемі тозу ізі қимасының ауданын төрт жазықтықта – әр 90 градуста – өлшеу негізінде анықталды. Сынақ ұзақтығы жұмыс уақыты мен орнатылған айналу жиілігіне байланысты есептеледі.

4.16-суреттегі графикте тозу ізінің төрт жазықтық бойынша қимасының 2D профильдері берілген. Графикте тозу ізінің тереңдігі мен ені айқын байқалады, максималды тозу аймағында биіктік айырмасы 5-6 мкм. Профильдер асимметриялы, бұл үйкеліс кезінде жүктеме мен температураның біркелкі таралмағанын және болаттың беткі беріктігінің әркелкі екенін көрсетеді. Үш өлшемді визуализация (4.17-сурет) бойынша 12Х1МФ болатының тозған аймағы мен тозбаған аймағы арасындағы айырмашылықты анық көруге болады. Тозу ізінің орталық бөлігі шұңқыр тәрізді, тереңдігі 12-14 мкм шамасында. Осы нәтижелерге сүйене отырып 12Х1МФ болаты жоғары температуралық трибологиялық сынақтан кейін біршама тозуға ұшырағанын көрсетті.



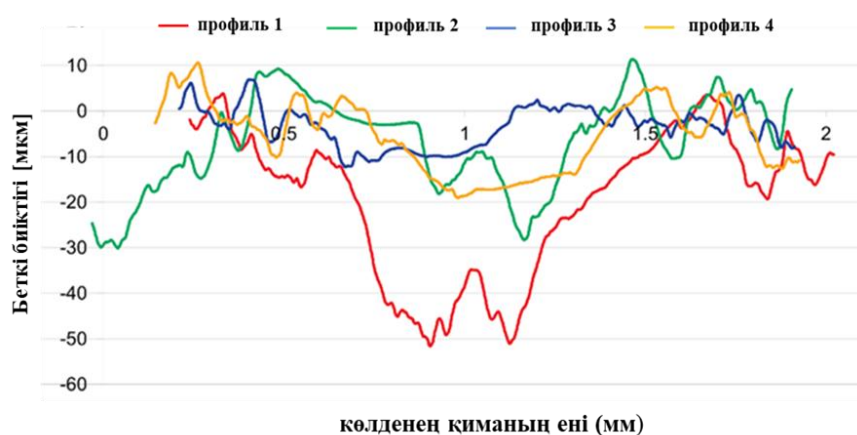
Сурет 4.16 – Жоғары температуралық трибологиялық сынаудан кейінгі 12Х1МФ болатының тозу ізінің 2D профилі



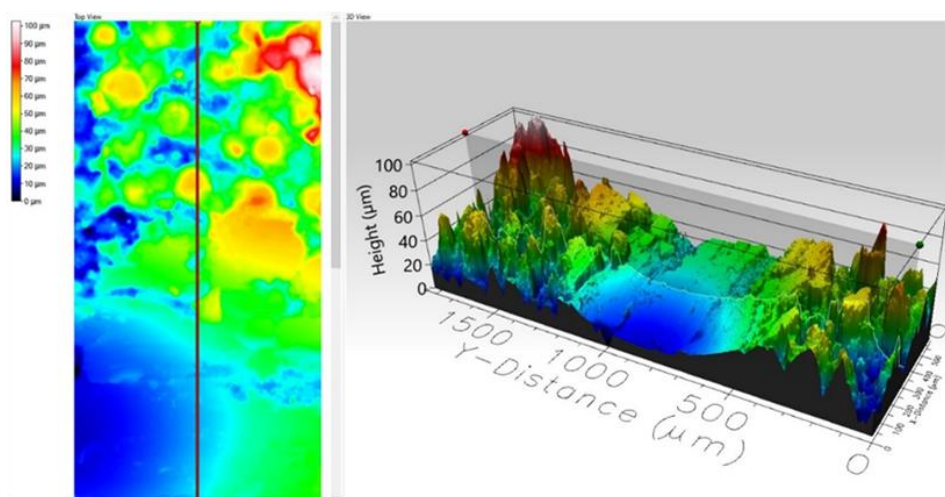
Сурет 4.17 – Жоғары температуралық трибологиялық сынаудан кейінгі 12Х1МФ болатының тозу ізінің 3D профилі

Жоғары температуралық трибологиялық сынаудан кейінгі біртекті NiCr-Al(20%) жабынының тозу ізінің 2D профильдері 4.18-суретте көрсетілген. Бұл графикте сынаудан кейінгі тозу ізінің әртүрлі бағытта (әр 90° сайын) өлшенген төрт қималық сызығы (профиль) көрсетілген. 1-профиль ең терең тозу аймағын көрсетеді, тереңдігі 50-55мкм шамасында. Қалған профильдерде тозу тереңдігі салыстырмалы түрде төмен

25-35 мкм аралығында. Профильдердің ассимметриялығы тозу процесінің біркелкі еместігін, әсіресе жылдам қызу мен салқындау нәтижесінде пайда болатын термиялық кернеулердің әсерін көрсетеді. 4.19-суретте жоғары температуралық трибологиялық сынаудан кейінгі біртекті NiCr-Al(20%) жабынының тозу ізінің 3D профилі көрсетілген. Бұл 3D визуализация беттік микрогеометрияны толық көлемде көрсетеді. Суреттен жабынның тозу аймағының тереңдігі шамамен 100 мкм-ге дейін жеткенін көруге болады. Орталық аймақта жұмсақ шұңқырлы тозу, ал жиектерде биік шыңдар мен біркелкі емес қабаттар байқалады. Бұл пластикалық деформация мен микроабразивті тозудың болғанын көрсетеді. Бұл 3D модель тозу ізінің көлемін дәл анықтауға мүмкіндік береді. Түсті картада көк және көгілдір аймақтар тозған бөлікті, ал қызыл және сары аймақтар бастапқы немесе жоғары биіктікті көрсетеді.



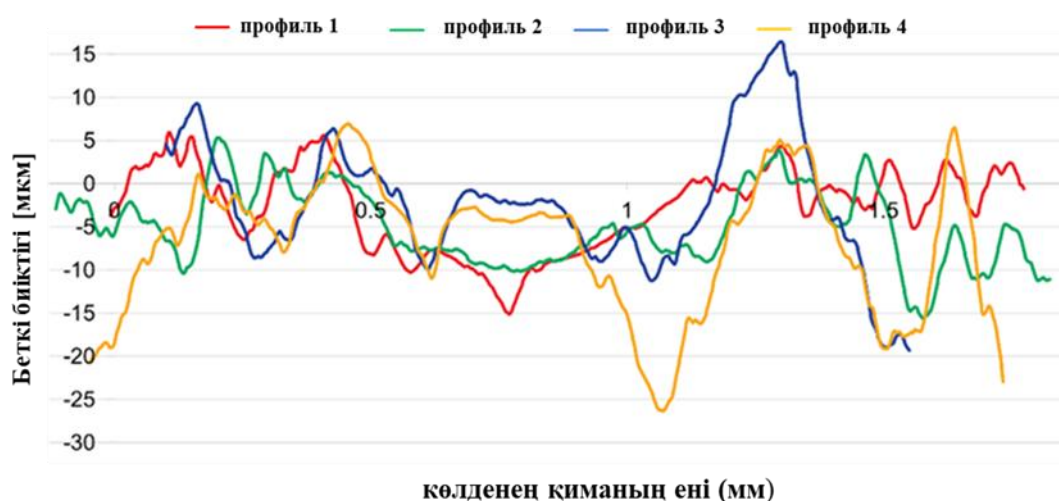
Сурет 4.18 – Жоғары температуралық трибологиялық сынаудан кейінгі біртекті NiCr-Al(20%) жабынының тозу ізінің 2D профилі



Сурет 4.19 – Жоғары температуралық трибологиялық сынаудан кейінгі біртекті NiCr-Al(20%) жабынының тозу ізінің 3D профилі

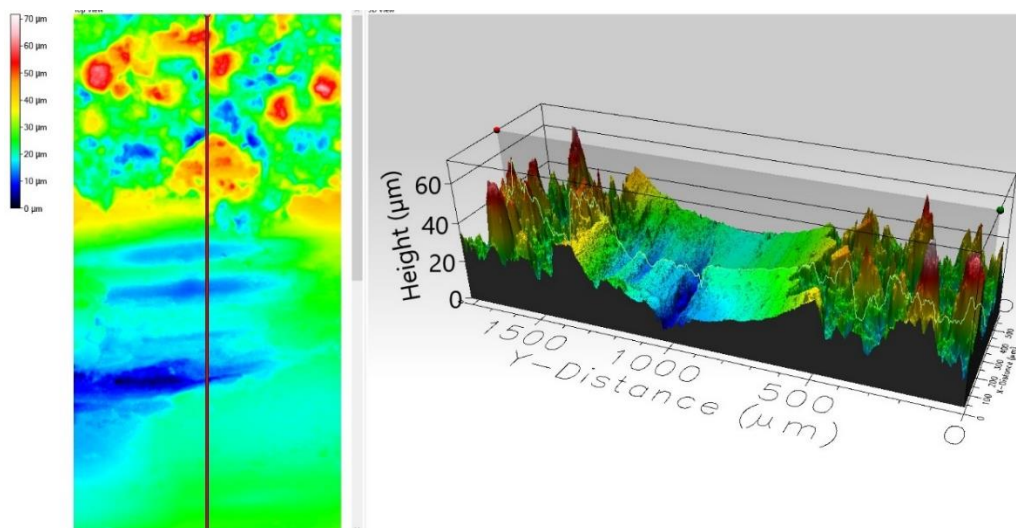
Жоғары температуралық трибологиялық сынаудан кейінгі градиентті NiCr-Al(20%) жабынының тозу ізінің 2D профильдері 4.20-суретте көрсетілген. Суретте тозу ізінің төрт бағыттағы (әр 90° сайынғы бұрышта) қималық

профильдері берілген. Бұл нәтижелер градиентті NiCr-Al(20%) жабынының жоғары температура кезінде үйкеліс әсерінен қалай тозғанын сипаттайды. Профильдер нәтижесі бойынша тозу тереңдігінің біршама төмен, орташа есеппен 10-15 мкм шамасында екенін көруге болады. Кейбір аймақтарда жеке шыңдар мен шұңқырлар бар. 1 мен 2-профильдерінде тозу біркелкі, тереңдігі шамамен 10 мкм. 3-профиль сызығында 15 мкм ден жоғары биік шыңдар байқалады, бұл жабынның жұмсақ -қатты фазалар арасындағы құрылымдық ауысымдарын көрсете алады. 4-профильде 25 мкм дейінгі тозу байқалады, бұл аймақтық термиялық кернеу немесе жүктеменің шоғырлану нәтижесі болуы мүмкін. Бұл профильдер градиентті құрылымның әр түрлі фазалық ауысулары мен қасиет өзгерістеріне ие екенін көрсетеді, бұл тозу ізінің бейсимметриялы және әр түрлі тереңдікте болуына әсер етеді.



Сурет 4.20 - Жоғары температуралық трибологиялық сынаудан кейінгі градиентті NiCr-Al(20%) жабынының тозу ізінің 2D профильдер.

4.21-суретте градиентті NiCr-Al(20%) жабынының жоғары температуралық трибологиялық сынағынан кейінгі 3D тозу профилі берліген. Суретте үйкеліс аймағының тозған бөлігі көгілдір/көк түспен көрінеді, тереңдігі шамамен 60-70 мкм. Жиегінде шыңдар мен қатпарлар (сары-қызыл түстер) тозуға ұшырамаған, бастапқы жабын құрылымын білдіреді. Тозу симметрия емес, бірақ жабын бетінде үздіксіз қорғаныс қабатының сақталғаны байқалады, бұл тозу процесінің баяулағанын көрсетеді. 3D карта нәтижесі градиентті NiCr-Al(20%) жабынның беткі құрылымының қаттылығы мен фазалық ауысулары әр түрлі бағытта екенін және бұл ауысулардың тозуға төзімділігінің арттыратынын дәлелдейді. Осылайша профилометрлік деректер NiCr-Al(20%) градиентті жабынының тозу ізінің ұсақ, локальды сипатта екенін және беттік қабаттың толықтай бұзылмағанын көрсетеді.



Сурет 4.21 - Жоғары температуралық трибологиялық сынаудан кейінгі градиентті NiCr-Al (20%) жабынының тозу ізінің 3D профилі.

Жоғары температуралық трибологиялық тозуға сынау нәтижелерінің жиынтығы 4.4 - кестеде келтірілген. Кестеде 12Х1МФ болатының орташа көлемдік тозу көрсеткіші шамамен ғана берілген. Мұның себебі, сынау барысында 12Х1МФ болаты қатты тотығуға ұшырап, беті коррозия өнімдерімен жабылған. Олар жойылғаннан кейін де, терең питтингтердің (шұңқырлардың) болуына байланысты үлгі бетін өлшеу айтарлықтай қиындық туғызған. Осылайша, 12Х1МФ болаты сынақ барысында біршама деградацияға ұшырап, алынған өлшемдер шамамен ғана бағаланған. Біртекті NiCr-Al(20%) жабынының сынақтан кейінгі үйкеліс коэффициенті 0.464 шамасына төмендеп және жалпы тозу көлемі 512.243 мм³-ке жоғарылады, ал градиентті NiCr-Al(20%) жабынының үйкеліс коэффициенті 0.503 шамасына дейін артып және тозу көлемі 2.5 есеге (202.043×10^{-6} мм³) кеміген, бұл градиентті жабын құрылымының тозуға төзімділікті артыруға тиімді екендігін көрсетеді.

Кесте 4.4. Жоғары температуралық трибологиялық тозуға сынау нәтижелерінің жиынтығы.

Материал	Температура	Av. CoF.	Av. Wv _t	Av Wv _k
	°C	$\times 10^{-6}$ [мм ³ /Nm]		
12Х1МФ болаты	700	0.478	>>1000	3.988
Біртекті NiCrAl(20%) жабыны		0.464	512.243	21.211
Градиентті NiCrAl(20%) жабыны		0.503	202.043	33.503

* Av. Wv_t – үлгінің орташа көлемдік тозу көрсеткіші

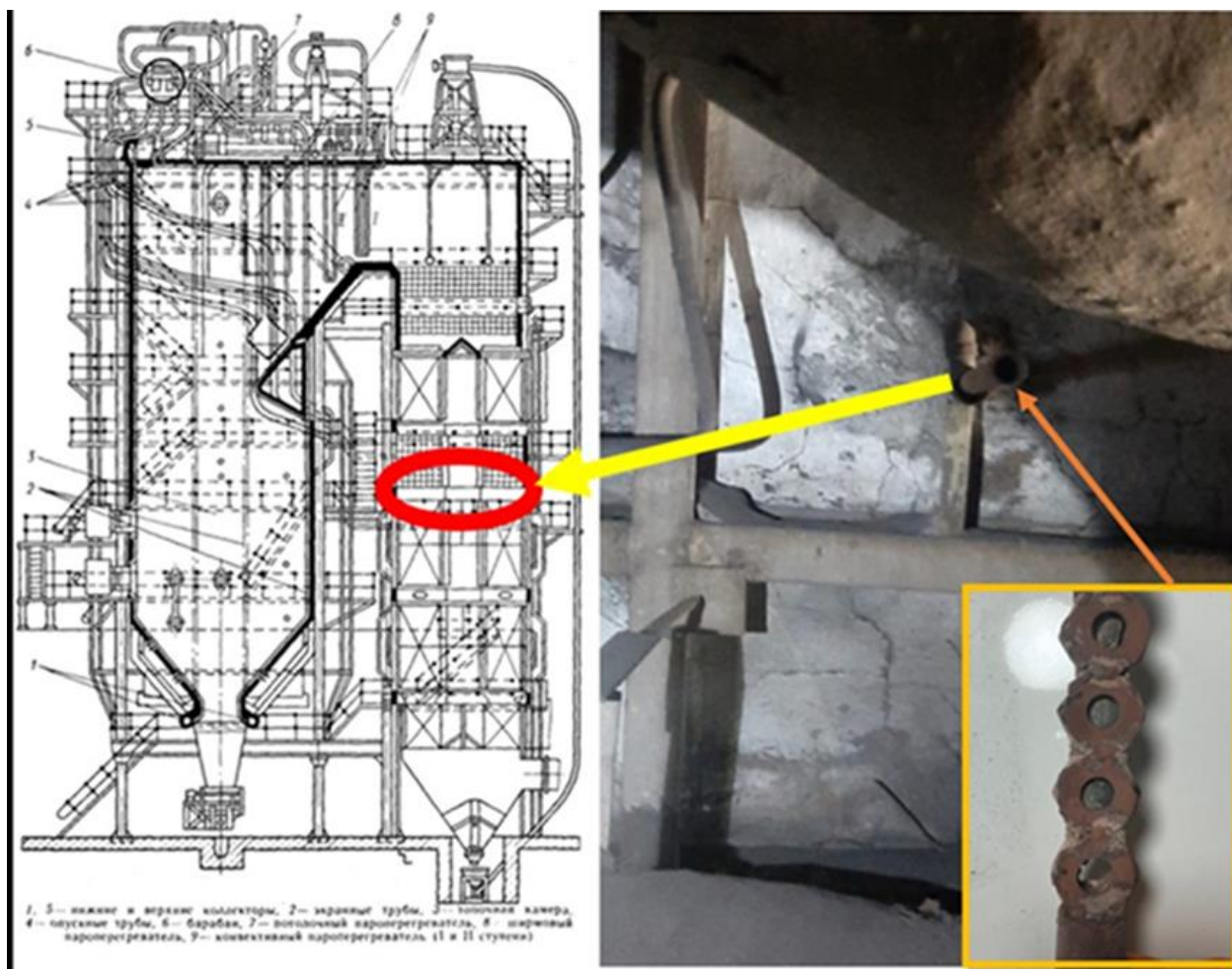
Av. Wv_k – шардың орташа көлемдік тозу көрсеткіші

Av. CoF – үйкеліс коэффициентінің орташа мәні

Жоғары температуралық трибологиялық сынақ нәтижелері NiCr-Al(20%) жабындарының термиялық жүктеме кезіндегі үйкеліс пен тозуға қарсы тұрақтылығын бағалауға мүмкіндік берді. Зерттеу барысында айтарлықтай тотығу мен тозуға ұшыраған жабынсыз 12Х1МФ болаты оның жоғары температура жағдайында қорғаныш жабындарынсыз жұмыс жасауы жұмыс жасау ұзақтығына айтарлықтай әсер ететінін көрсетті. Жоғары температуралық трибологиялық сынаудан кейін біртекті NiCr-Al(20%) жабыны төмен үйкеліс коэффициентімен (0.464) ерекшеленіп, жабын бетінде салыстырмалы түрде тұрақты тозу ізі түзілді. Алайда, оның тозу көлемі мен беткі деградация тереңдігі біршама жоғары болды. Бұл жабынның термиялық және механикалық жүктемелерге қарсылығы шектеулі екенін көрсетеді. Ал градиентті NiCr-Al(20%) жабынының үйкеліс коэффициенті сәл жоғары болса да (0.503), тозу көлемі жағынан басқа үлгілерден 2.5 есе төмен нәтиже көрсетті. Бұл оның градиентті құрылымындағы тереңдік бойынша фазалық өзгерістер (Al → NiCr) нәтижесінде микроқатпарлар мен беткі бұзылыстардың алдын алғанын көрсетеді. Осылайша, жоғары температурада жұмыс жасайтын механизмдер үшін градиентті NiCr-Al(20%) жабыны тиімді шешім болып табылады. Ол термиялық тұрақтылық, тозуға төзімділік және құрылымдық сенімділік бойынша оңтайлы нәтижелер көрсете алады.

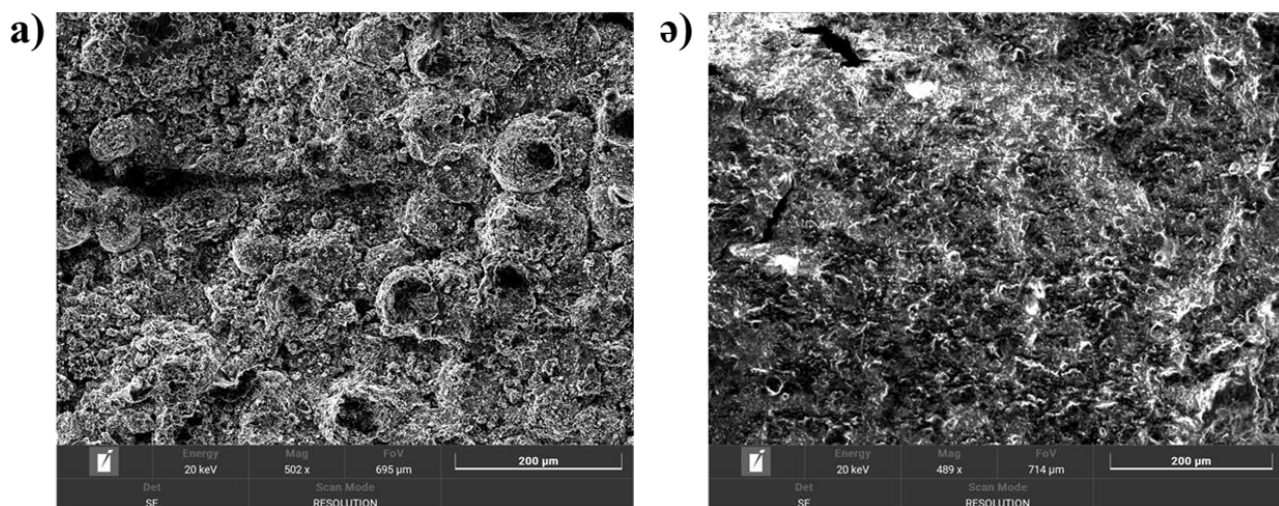
4.4 Өндірістік ортада өткізілген жоғары температуралық сынақтан кейінгі Ni-Cr-Al негізіндегі біртекті және градиентті қорғаныш қабаттарын зерттеу

Қорғаныш жабындарының жоғары температуралық қасиеттерін бағалаудың сенімді әдісі бұл тікелей өндірістік орталарда жүргізілетін жоғары температуралық сынаулар. Бұл сынаулар жабынның қызмет ету мерзімін нақты бағалауға мүмкіндік береді. Өндіріс жағыдайында жүргізілетін бұл сынауларда жабындар термиялық циклдер, динамикалық жүктемелер, оттекті атмосфера, кейде құрамында тұздары бар коррозиялық газдар әсерінде болады. Нәтижесінде жабынның құрылымдық тұрақтылығы, окистік қабаттардың адгезиясы, жарықшаққа ұшырауы және механикалық тозуы сияқты сипаттамалары зерттеледі. Бұл диссертациялық жұмыста біртекті және градиентті NiCr-Al(20%) жабындары Өскемен қаласындағы Согра жылу электр станциясында (ЖЭС) өндірістік ортада жоғары температуралық тотығуға сыналды. Бұл сынақта NiCr-Al(20%) жабындары бар үлгілер ЖЭС жоғары температуралық ($\approx 700\text{ }^{\circ}\text{C}$) аймағына орналастырылып, екі апта бойы жұмыс жағдайында сыналды. 4.22-суретте ЖЭС бу генераторының конструкциялық сызбасы көрсетіліп, қызыл сопақша және сары көрсеткіш арқылы зерттеу үлгілері орналастырылған жоғары температуралық аймақ көрсетілген. Бұл аймақ қыздырылған түтін газдары мен бу құбырлары арасында орналасқан. Мұндай орта тотықтырғыш компоненттерге, күйе қалдықтарына, қатты бөлшектерге және жылу циклдеріне бай, бұл зерттелетін үлгілерге кешенді термохимиялық әсер етеді. Суреттің оң жақ бөлігінде нақты жабын үлгілерін бекіту нүктесі және олар орнатылған құрылым бейнеленген.



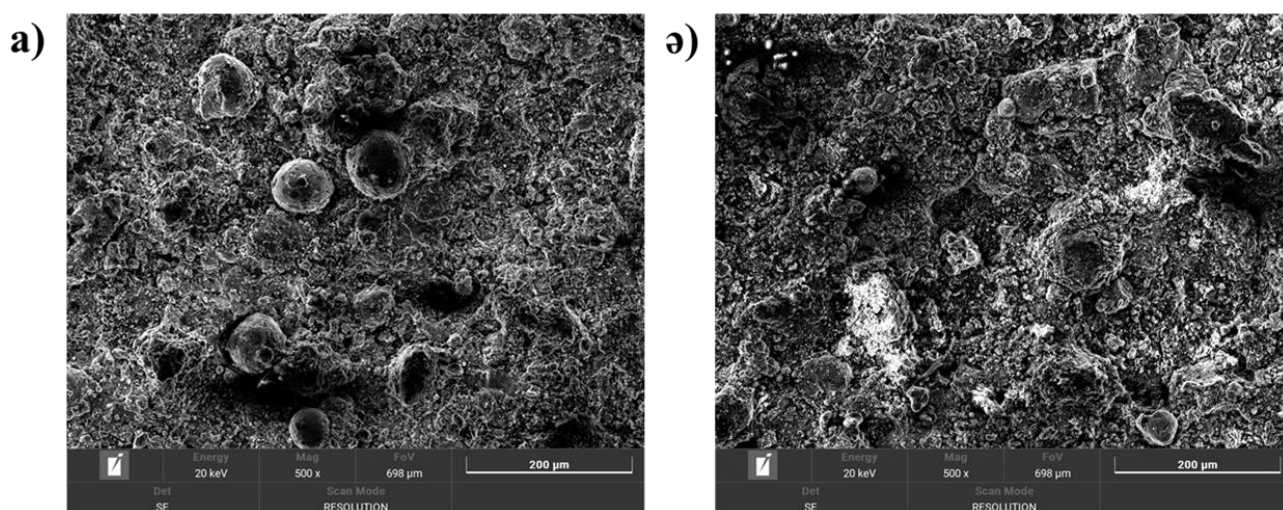
Сурет 4.22 – ЖЭС бу генераторының конструкциялық сызбасы және үлгілер орналастырылған жоғары температуралық аймақ

4.23-суретте біртекті NiCr-Al(20%) жабынының өндірістік ортада жоғары температурада сынауға ұшырағанға дейінгі және кейінгі беткі морфологиясы көрсетілген. Сынауға дейін жабын беті дөңгелек және сопақ пішінді қуыстарға ие, жабынның беті біркелкі емес (сурет 4.23а). Бұл микрокеуектер детонациялық бүркі кезінде қалыптасқан. Ал екі апта бойы $\approx 700^{\circ}\text{C}$ температурада өндірістік ортада болғаннан кейінгі түсірілген біртекті NiCr-Al(20%) жабыны 4.23ә - суретінде көрсетілген. Суреттен сынақтан кейін жабынның беткі морфологиясының қатты өзгерісі байқалады, жабын беті тегістеліп қалған. Жабын бетіндегі ақшыл аймақтар тотыққан немесе шлак бөлшектерінің қалдықтары болуы мүмкін. Беткі қабатта эрозия белгілері, микрожарықшақтар және беткі қабаттың қабыршақтануы байқалады, бұл жабынның жоғары температура мен агрессивті газ әсерінен тотығуға ұшырағанын дәлелдейді. Алайда осы өзгерістерге қарамастан, жабын негізінен бүтін күйінде сақталды, бұл оның жоғары температуралық жағдайларға айтарлықтай бұзылуға төзімділігін дәлелдейді.



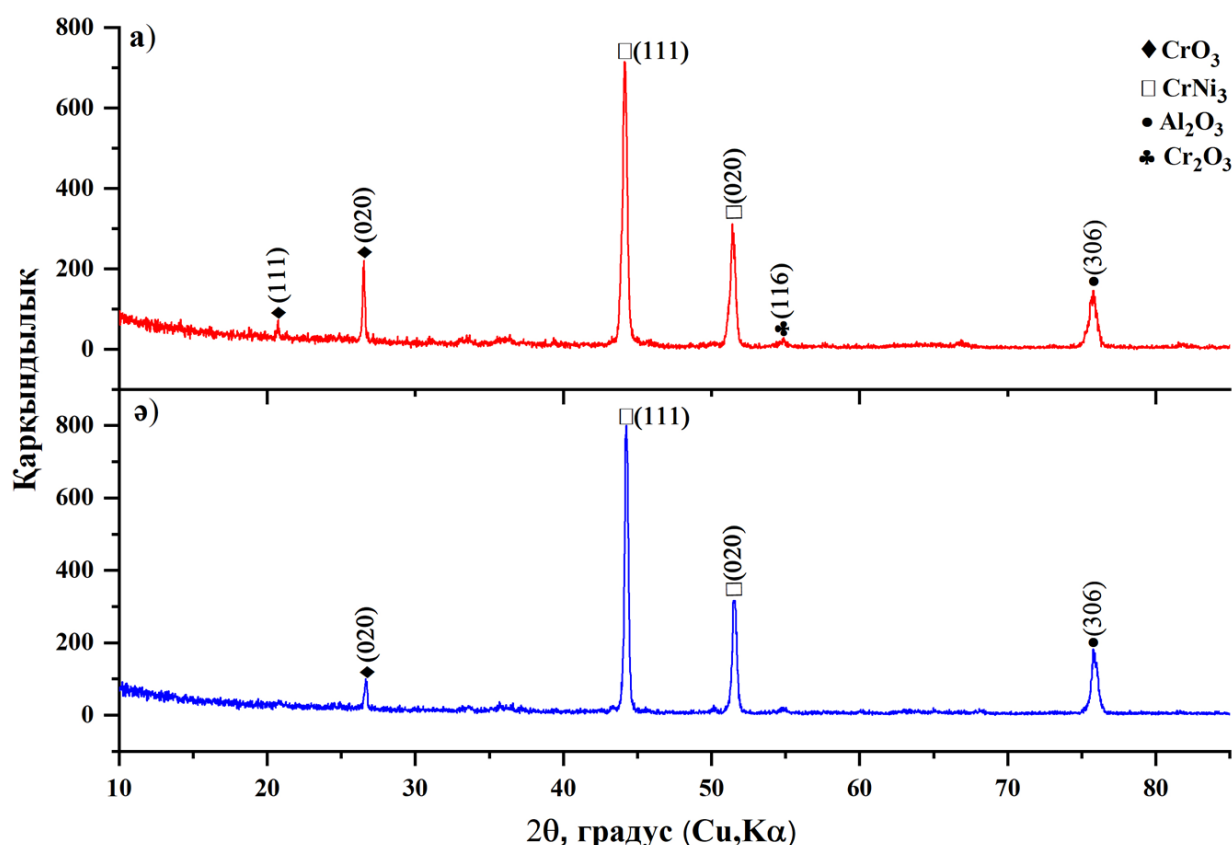
Сурет 4.23 – NiCr-Al(20%) біртекті жабындарының өндірістік ортада жоғары температураға ұшырағанға дейін (а) және кейінгі (б) беткі морфологиясы

Өндірісітік ортада жоғары температуралық сынауға дейінгі және кейінгі градиентті NiCr-Al(20%) жабынының беткі морфологиясы 4.24-суретте көрсетілген. Жабын беті сынаққа дейін (4.24а-сурет) детонциялық бүрку процесінің инерциясынан дөңгелек, шекарасы айқын кеуектер мен микробүртіктерден (шашыраған балқымалар) тұрады. Жабында микрожарықшақтар жоқ. ЖЭС екі апта өндірістік ортада сыналған соң жабынның беттік құрылымы бұзылғанымен, толық деградация байқалмайды (4.24б-сурет). Жабын бетінде микрожарықшақтар мен қабыршақтану байқалмайды, бұл градиентті құрылымның термиялық және механикалық тұрақтылығы жоғары екенін көрсетеді. Жабын бетінің қара аймақтарында кеуектілік пен газ өтімділігі белгілері байқалады, бірақ олар терең емес және құрылымдық бұзылу байқалмайды.



Сурет 4.24 – NiCr-Al(20%) градиентті жабындарының өндірістік ортада жоғары температураға ұшырағанға дейін (а) және кейінгі (б) беткі морфологиясы

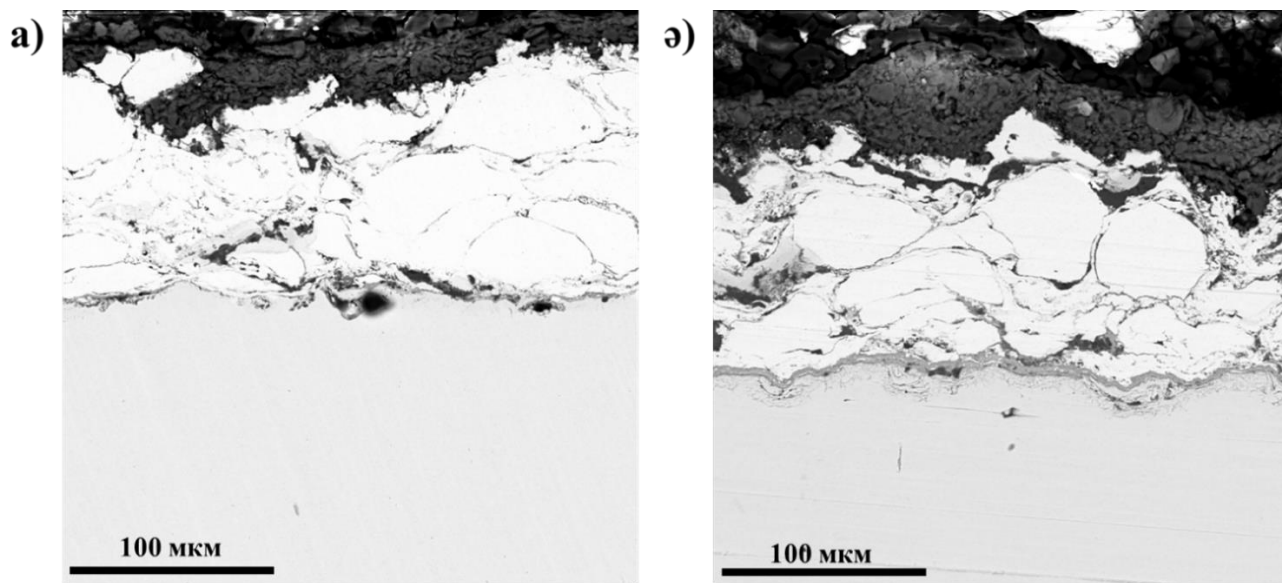
4.25-суретте өндірістік ортада жоғары температуралық сынаудан кейінгі біртекті және градиентті NiCr-Al(20%) жабындарының рентген фазалық талдау нәтижелері көрсетілген. Суреттен градиентті жабында (4.25а-сурет) CrNi₂ интерметалдық фазасы басым, бұл жабынның жоғары термиялық тұрақтылыққа ие екенін көрсетеді. Сонымен қатар жабын бетін Cr₂O₃ және Al₂O₃ қорғаныш оксидтері түзілген. Бұл фазалық құрам градиентті NiCr-Al(20%) жабынының тотығу мен коррозияға төзімділігін арттырғанын көрсетеді. Жабын бетінде әдетте агрессивты тотығу жағдайында түзілетін CrO₃ тотыққан хром фазасы да түзілген. Ал біртекті NiCr-Al(20%) жабыны бетінде CrNi₂ фазасы сақталғанымен, тотығуға төзімді оксидтер (Al₂O₃, Cr₂O₃) аз немесе мүлде анықталмаған. Бұл біртекті жабынның қорғаныш қабат түзу қабілетінің әлсіз екенін көрсетеді.



Сурет 4.25 – Өндірістік ортада жоғары температуралық сынаудан кейінгі градиентті (а) және біртекті (ә) NiCr-Al(20%) жабындарының рентген фазалық талдау нәтижелері.

4.26-суретте өндірістік ортада жоғары температуралық сынақтан кейінгі біртекті және градиентті NiCr-Al(20%) жабындарының көлденең қимадағы СЭМ нәтижесі көрсетілген. Бұл нәтиже жабындардың термиялық сынаудан кейінгі ішкі құрылымын және өзгерістерін бағалауға мүмкіндік береді. Біртекті жабынның көлденең қимасынан (4.26а-сурет) жабын ішінде жарықшақтар, кеуектілік және үгітілген аймақтар айқын байқалады. Жабынның кей жерлерінде дезинтеграция (құрылымның ыдырауы) көрінеді. Бұл өзгерістер жоғары

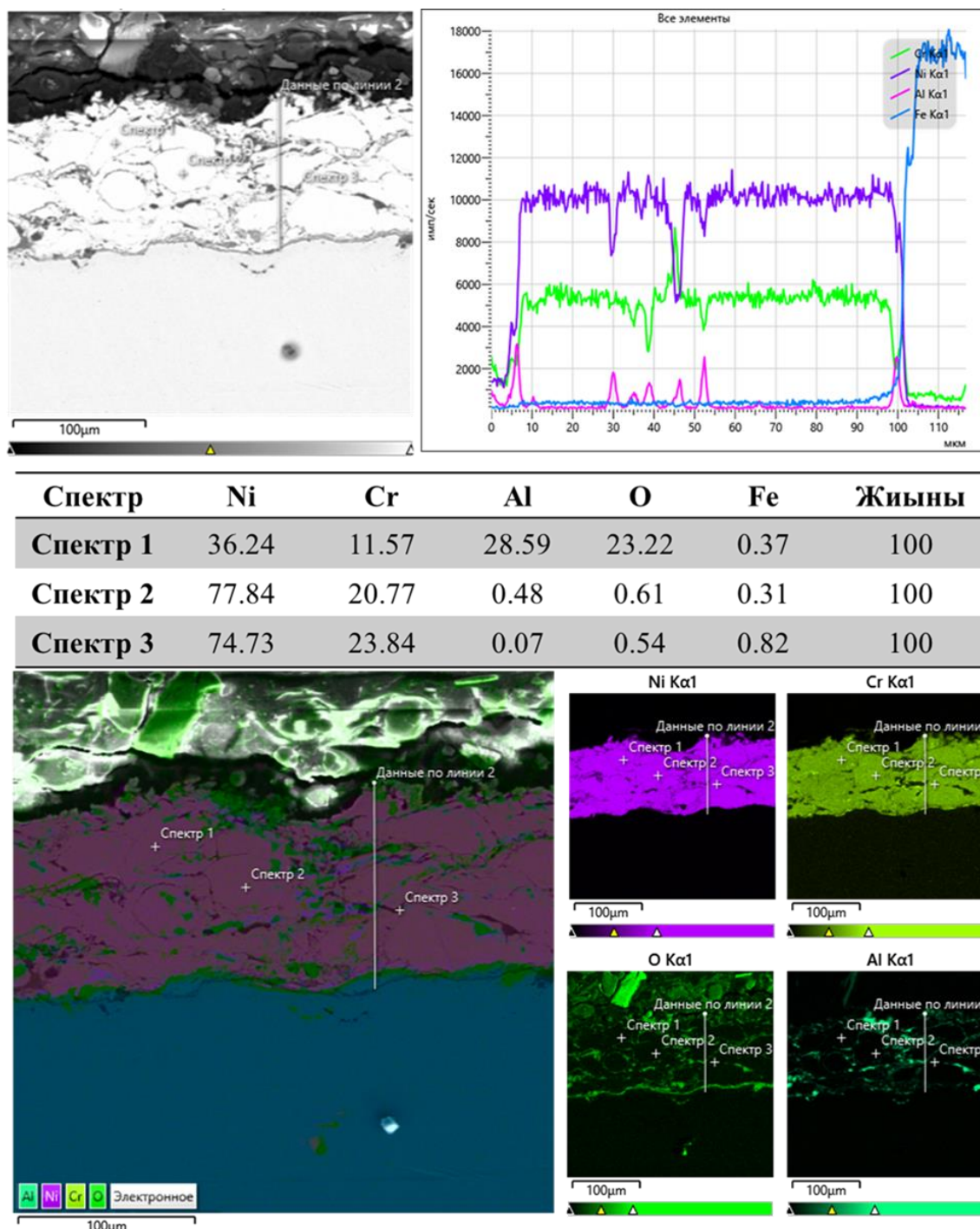
температурада және агрессивті атмосфера әсерінен тотығу мен термиялық шаршау процесінің қарқынды жүргенін көрсетеді. Ал градиентті құрылымдағы NiCr-Al(20%) жабынының нәтижесі бойынша (4.26-сурет) жабында микрожарықтар мен кеуектер аз, жабынның ішкі аймақтарында ешқандай үгітілу мен ажырау белгілері байқалмайды. Беткі қабаттың белгілі бір дәрежеде тотығуы байқалады, бірақ бұл қорғаныш оксид қабатының түзілуінен болған, ол жабынның бұзылуын тежеуге көмектеседі.



а) біртекті; ә) градиентті

4.26 - сурет. Өндірістік ортада жоғары температуралық сынақтан кейінгі NiCr-Al(20%) жабындарының көлденең қимадағы СЭМ суреті

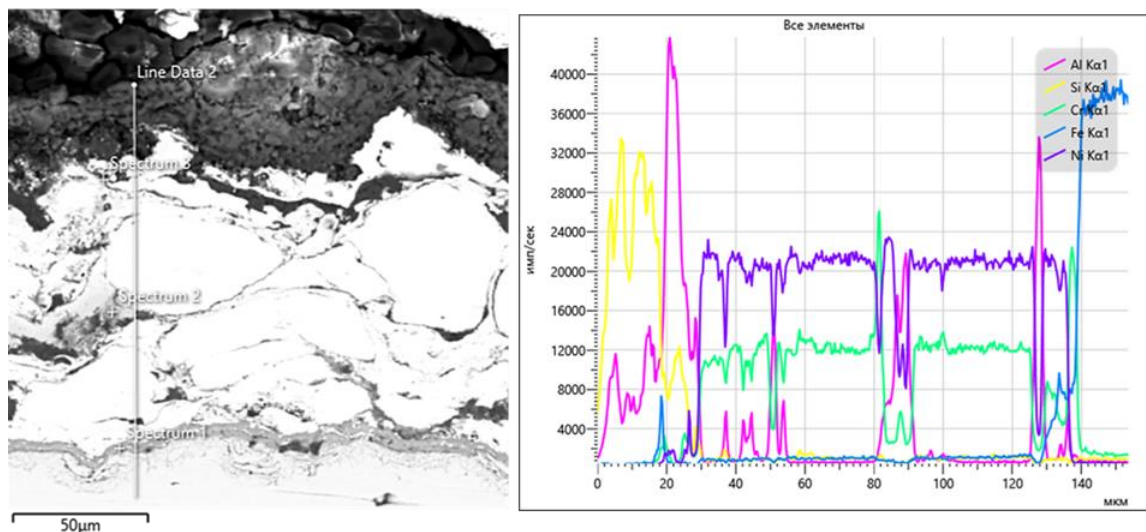
4.27-суретте өндірістік ортада жоғары температуралық сынаудан өткен біртекті NiCr-Al(20%) жабынының көлденең қимасы бойынша ЭДС нәтижелері көрсетілген. Жабын ішінде Cr және Ni элементтері біркелкі таралған және бұл элементтер жабынның негізгі компоненттері болып табылады. Ал спектрлік талдау нәтижесі бойынша жабын құрамында Al элементі аз мөлшерде, тек жабын бетінде біраз мөлшері шоғырланған. Бұл жабын бетінде жоғары температура кезінде тотығу әсерінен Al_2O_3 қорғаныш оксидінің түзілуін көрсетеді. Элементтердің карталық таралу нәтижесі бойынша оттегі (O) және алюминий (Al) элементтері жабынның жоғарғы жағында шоғырланған, бұл жабын бетінде оксид қабатының түзілгенін көрсетеді. Элементтердің сызықтық таралу нәтижесі бойынша жабынның бетінен 100 мкм аймағында Fe элементі күрт жоғарылайды, бұл жабын мен субстрат арасындағы шекараны айқындайды. ЭДС талдау нәтижелеріне сүйене отырып біртекті NiCr-Al(20%) жабынының өндірістік ортада жоғары температурада сынауға ұшырағаннан кейін тотығуға ұшырап, бетінде оксидтік қорғаныш қабатын түзгенін, бірақ жабын құрамындағы алюминийдің төмен мөлшері жабынның төсенішті ұзақ мерзімді қорғауына жеткіліксіз екенін көрсетті.



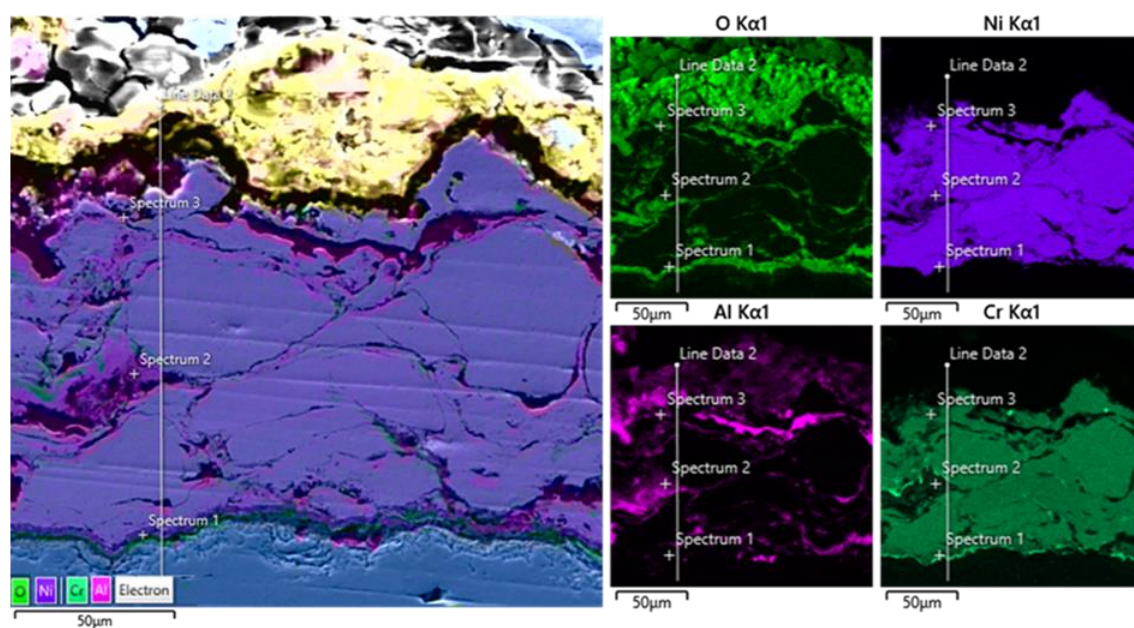
Сурет 4.27 – Өндірістік ортада жоғары температуралық сынаудан өткен біртекті NiCr-Al(20%) жабынының көлденең қимасы бойынша ЭДС нәтижелері

4.28-суретте өндірістік ортада жоғары температурада сынаудан өткен NiCr-Al(20%) градиентті жабынының көлденең қимасы бойынша алынған EDS нәтижелері ұсынылған. Талдау жабын мен төсеніш арасындағы элементтік құрамның таралуын, тотығу процесін, сондай-ақ градиенттік құрылымның артықшылықтарын көрсетеді. Элементтердің сызықтық таралу графигі бойынша алюминий (Al) мен хром (Cr) элементтерінің жабынның беткі қабатында өте жоғары мөлшерде таралғанын көруге болады. Бұл жабын бетінде көп мөлшерде Al_2O_3 және Cr_2O_3 сияқты қорғаныш оксидтерін түзуге мүмкіндік береді. Жабынның бетінен төсенішке қарай әр жерінен алынған спектрлардың нәтижесі

бойынша алюминийдің төсеніштен жабын бетіне қарай арта таралғанын көрсетті. Элементтердің карталық таралу нәтижесі бойынша никель (Ni) мен (Cr) элементтері жабынның ішкі аймақтарында біркелкі және басым шоғырланған. Ал Fe элементі жабынның төменгі бөлігінде орналасқан, бұл төсеніш пен жабын шекарасын нақты көрсетеді. Бұл EDS нәтижелері градиентті құрылымды NiCr-Al(20%) жабынының өндірістік жоғары температура жағадайында тотығуға төзімділігі жоғары, құрылымдық тұтастығы жақсы екенін көрсетеді.



Спектр	Ni	Cr	Al	O	Fe	Жиыны
Спектр 1	58.01	20.34	6.23	4.3	11.12	100
Спектр 2	53.91	17.64	16.96	11.20	0.29	100
Спектр 3	43.93	12.61	29.06	14.40	-	100



Сурет 4.28 – Өндірістік ортада жоғары температуралық сынаудан өткен градиентті NiCr-Al(20%) жабынының көлденең қимасы бойынша ЭДС нәтижелері

Осылайша, NiCr-Al(20%) біртекті және градиентті детонациялық жабындарын өндірістік ортада жүргізілген жоғары температуралық тотығуға сынау нәтижелері бойынша осы екі типтегі жабындардың жоғары температуралық тотығу мен коррозиялық әсерлерге төтеп беру қабілеттерінде айтарлықтай айырмашылық бар екенін көрсетті. Зерттеу барысында біртекті NiCr-Al(20%) жабындарының бетінде микрожарықтар мен қабыршақтану белгілері байқалды. ЭДС нәтижелері бойынша жабын бетінде жеткілікті мөлшерде алюминий (Al) элементі концентрациясы түзілмеген, бұл қорғаныш оксид жабындарының түзілуін төмендетті. Ал градиентті NiCr-Al(20%) жабындары өз кезегінде жоғары термиялық тұрақтылық көрсетті. СЭМ көлденең қимасы нәтижелері бойынша жабын құрылымының тұтастығы мен алюминий элементінің жабын тереңдігі бойынша градиентті таралуы сақталған. Сонымен қатар жабын бетінде көп мөлшерде алюминий (Al) және хром (Cr) элементтері түзілген, бұл жабын бетінде Al_2O_3 және Cr_2O_3 қорғаныш оксидтерінің түзілуіне мүмкіндік берді.

Бөлім бойынша қорытынды

Осы зерттеудің төртінші бөлімінде NiCr-Al(20%) негізіндегі біртекті және градиентті қаптамалардың жоғары температура жағдайында жұмыс жасау қабілеті жан-жақты зерттелді. Эксперименттік жұмыстар зерттеліп отырған жабындардың тотығуға, коррозияға және тозуға төзімділігіне олардың құрылымдық ерекшеліктері мен алюминийдің таралу сипаты айтарлықтай әсер ететінін көрсетті. Осылайша, зерттеу нәтижелерінің 4-бөлімінде алынған мәліметтерге сүйене отырып, келесі қорытындылар жасауға болады:

1. Жоғары температуралық циклдік тотығу сынақтары көрсеткендей, қаптама құрылымындағы алюминий элементінің градиенттік таралуы жабын бетінде тығыз және тұрақты Al_2O_3 қорғаныш қабатының түзілуіне жағдай жасайды. Сонымен қатар, Cr_2O_3 фазасының жабынның ортаңғы аймақтарында түзілуі оның құрылымдық тұтастығын сақтап, тотығу тереңдігін шектеді. Бұл факторлар градиентті NiCr-Al(20%) қаптаманың тотығуға төзімділігін біртекті NiCr-Al(20%) жабынмен салыстырғанда едәуір арттыратынын көрсетті.

2. Ыстық коррозияға төзімділік $Na_2SO_4/NaCl$ құрамындағы агрессивті ортада 700 °C температурада сынақтары барысында градиентті NiCr-Al(20%) қаптамасы белгілі бір уақытқа дейін құрылымдық тұрақтылығын сақтай отырып, коррозияға төзімділіктің артқандығын көрсетті. Алайда ұзақ мерзімді әсер ету кезінде белгілі бір құрылымдық бұзылыстар байқалғанымен, олар біртекті жабындарға қарағанда анағұрлым кеш пайда болды, бұл градиентті қаптаманың коррозияға қарсы тиімділігін көрсетеді.

3. Жоғары температуралық трибологиялық сынақ нәтижелері градиентті NiCr-Al(20%) жабынының тозуға төзімділігі біртекті NiCr-Al(20%) қаптамасымен салыстырғанда 2.5 есе жоғары екенін көрсетті. Біртекті жабынның үйкеліс коэффициенті аз болғанымен, тозу көлемі және беткі бұзылу тереңдігі жоғары болып тіркелді. Керісінше, градиентті қаптама тереңдік бойынша фазалық ауысу есебінен микроқатпарлар мен жарықшақ түзілуінің алдын алып, ұзақ мерзімді қызметке бейімділік танытты.

4. Өндірістік ортада жоғары температуралық тотығу сынағынан өткен үлгілерді СЭМ және ЭДС арқылы талдау нәтижелері жоғарыда айтылған тұжырымдарды нақтылады. Біртекті NiCr-Al(20%) қаптамаларында алюминий концентрациясының төмендігі мен құрылымдық бұзылыстар (жарықшақтар, қабыршақтану) жиі тіркелсе, градиентті NiCr-Al(20%) жабындарында алюминий мен хром элементтерінің жабын тереңдігі бойынша тиімді таралуы нәтижесінде Al_2O_3 және Cr_2O_3 сияқты қорғаныш оксид қабаттарының түзілуі айқын байқалды.

Жалпы алғанда, жүргізілген зерттеулер NiCr-Al(20%) градиентті қаптамалардың жоғары температуралық агрессивті ортада біртекті NiCr-Al(20%) жабындармен салыстырғанда әлдеқайда жоғары тотығуға, коррозияға және тозуға төзімділік көрсететінін дәлелдеді. Бұл оны энергетикалық қондырғылар мен жоғары жүктемелі жабдықтарда перспективті қолдану нысаны ретінде ұсынуға толық негіз береді.

ҚОРЫТЫНДЫ

Диссертациялық жұмыста жүргізілген зерттеулердің негізгі нәтижелері бойынша келесі қорытындыларды жасауға болады:

1. Детонациялық бүрку кезінде Ni-Cr-Al негізіндегі жабын құрылымының қалыптасуы зерттелді.

1.1. Детонациялық оқпанды $O_2/C_2H_2=1,856$ қатынасына сәйкес дайындалған оттегі-ацетилен қоспасымен оттегі-ацетилен жарылғыш газ қоспамен оқпанды 40% және 50% толтырған кезде жабын бетінде тек $CrNi_2$ фазасы байқалды. Ал толтыру көлемі 25% және 30% болғанда $CrNi_2$ фазасымен қатар таза алюминий (Al) элементі мен NiAl интерметаллидтік қосылыстарының түзілуі тіркелді.

1.2. Элементтердің құрылымдық таралуына жүргізілген талдау нәтижелері оқпанды жарылғыш газбен толтыру көлемі азайған сайын (50% - 25%) жабын бетінде алюминийдің шоғырлану дәрежесінің артатынын көрсетті. Алайда алынған жабынның кеуектілігі жоғарылап, ал адгезиялық беріктігі төмен екені анықталды. Сонымен қатар, оқпанды 40% және 50% көлемде толтырған жағдайда алынған жабынның қалыңдығы 25% және 30% толтырылған жағдайдағы жабындарға қарағанда 2,5–3 есеге жоғары болды.

2. Детонациялық бүрку әдісімен Ni-Cr-Al негізіндегі элементтердің таралуы бойынша градиентті жабын алу әдісі әзірленді.

2.1. Детонациялық бүрку технологиясының оқпанды жарылғыш газбен толтыру деңгейін азайту арқылы 50 %-дан 40 %-ға дейін болат төсенішінің бетінде жақсы адгезиялық беріктікке ие NiCr негізіндегі жабын алынды, әрі біртіндеп 25 %-ға дейін төмендету арқылы қаптаманың беткі қабаттарында Al жоғары мөлшерде жинақталған химиялық құрамы бойынша градиентті қаптама алатын әдісі анықталды.

2.2. Детонациялық әдіспен NiCr-Al негізіндегі химиялық құрамы бойынша градиентті құрылымды қаптама алудың әдісі пайдалы модель бойынша патентпен қорғалды («Функционалды градиентті жабынды алу әдісі», № 8922, 07.03.2024).

2.3. Детонациялық бүрку әдісімен алюминийдің әртүрлі массалық үлесінде алынған NiCr-Al негізіндегі қаптамалардың құрылымдық қалыптасу заңдылықтары анықталды. Энергодисперстік спектроскопия әдісінің сызықтық, локалды және карталық таралу тәсілдерін қолдана отырып жасалған зерттеу нәтижелері NiCr-Al қаптама құрамында 20% Al мөлшерінің элементтік таралуы бойынша градиентті қаптама алуға тиімді екенін дәлелдеді.

3. Детонациялық бүрку әдісімен алынған Ni-Cr-Al негізіндегі элементтердің таралуы бойынша біртекті және градиентті жабындардың механика-трибологиялық және ыстыққа төзімділік қасиеттерін салыстырмалы зерттелді.

3.1. Элементтердің таралуы бойынша градиентті NiCr-Al (20%) қаптамаларының біртекті құрылымды қаптамамен салыстырған микроқаттылығы мен адгезиялық беріктігі шамамен 30 % жоғары, ал құрғақ үйкеліс кезіндегі тозу жылдамдығы шамамен 2 есе төмен екені анықталды.

3.2. Жоғары температуралық циклдік тотығу сынақтары нәтижесінде қаптама құрылымындағы алюминий элементінің градиенттік таралуы қаптама бетінде тығыз және тұрақты Al_2O_3 қорғаныш қабатының түзілуіне жағдай жасайтыны анықталды. Сонымен қатар, Cr_2O_3 фазасының қаптаманың ортаңғы аймақтарында түзілуі оның құрылымдық тұтастығын сақтап, тотығу тереңдігін шектеді.

3.3. Ыстық коррозияға төзімділік сынақтары барысында градиентті NiCr-Al(20%) қаптамасы құрылымдық тұрақтылығын белгілі бір уақытқа дейін сақтай отырып, коррозияға төзімділіктің артатыны анықталды.

3.4. Жоғары температуралық трибологиялық сынақ нәтижелері бойынша градиентті NiCr-Al(20%) қаптамасының тозуға төзімділігі біртекті қаптамамен салыстырғанда шамамен 2,5 есе жоғары екені анықталды. Біртекті қаптаманың үйкеліс коэффициенті аз болғанымен, тозу көлемі және беткі бұзылу тереңдігі жоғары болатыны тіркелді.

3.5. Өндірістік ортада жоғары температуралық тотығу сынағынан кейін біртекті NiCr-Al(20%) қаптамасында алюминий концентрациясының төмендігі мен құрылымдық бұзылыстар (жарықшақтар, қабыршақтану) анықталды, ал градиентті NiCr-Al(20%) қаптамасында алюминий мен хром элементтерінің қаптама тереңдігі бойынша тиімді таралуы нәтижесінде жабын бетінде Al_2O_3 және Cr_2O_3 сияқты қорғаныш оксидті қабаттарының түзілетіні анықталды.

Қойылған міндеттердің толық шешілуіне баға беру

Жалпы алғанда, диссертациялық жұмыста детонациялық оқпанды жарылғыш қоспамен толтыру көлемі параметрінің NiCr-Al жабындарының морфологиясына, элементтік құрамына, фазалық құрамына және қасиеттеріне әсері жүйелі түрде зерттелді. Жарылғыш қоспамен оқпанды толтыру деңгейін және ұнтақтағы алюминийдің массалық үлесін өзгерту арқылы элементтердің таралуы бойынша градиентті жабын алынды. Біртекті және градиентті NiCr-Al(20%) жабындардың механика-трибологиялық және ыстыққа төзімділік қасиеттеріне кешенді салыстырмалы зерттеулер жүргізілді. Осылайша, диссертацияда қойылған барлық міндеттер толық көлемде орындалды.

Диссертациялық жұмыстың нәтижелерін қолдану бойынша ұсыныстар

Диссертациялық жұмыста алынған нәтижелер жоғары температуралық тотығуға, агрессивті коррозиялық ортаға және қарқынды тозуға ұшырайтын бөлшектерге қорғаныш жабындарын әзірлеу үшін пайдаланылуы мүмкін. Ұсынылған NiCr-Al(20%) негізіндегі градиентті жабынын алу технологиясы энергетикалық машина жасау саласында жұмыс істейтін жабдықтардың жұмыс мерзімін арттыру мақсатында қолдануға болады. Пайдалы модель ретінде патенттелген функционалды градиентті жабын алу әдісі өндірісте, машиналарды қалпына келтіру және жетілдіру салаларында енгізілуге лайық. Сонымен қатар, алынған ғылыми нәтижелер ыстыққа және тозуға төзімді жаңа материалдарды жасау бойынша одан әрі ғылыми зерттеулер жүргізу үшін негіз бола алады.

Диссертациялық жұмыстың ғылыми деңгейіне баға беру

Диссертациялық жұмыстың жоғары ғылыми-техникалық деңгейі жақсы апробацияланған эксперименттік әдістер мен зерттеу тәсілдерін қолдануымен,

алынған эксперименттік мәліметтердің көптігімен және олардың статистикалық өңделуімен қамтамасыз етілді. Диссертацияның негізгі нәтижелері Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Білім беру сапасын қамтамасыз ету комитеті ұсынған басылымдарда, сондай-ақ Web of Science және Scopus деректер базасына кіретін шетелдік рецензияланатын ғылыми журналдарда және халықаралық конференциялардың материалдар жинақтарында жарияланды.

Қорытынды бөлімінде автор диссертациялық жұмысты дайындау барысында көрсеткен көмегі мен қолдауы үшін ғылыми кеңесшілері философия докторы (PhD), қауымдастырылған профессор Рахадиллов Бауыржан Қорабайұлына, философия докторы (PhD), қауымдастырылған профессор Сағдолдина Жұлдыз Болатқызына және Вроцлав техникалық университетінің «Машина құрылымдарының негіздері және трибология» кафедрасының профессоры Войцех Казимир Виелебеге ерекше алғыс білдіріледі.

Автор «Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті» КЕ АҚ «Беттік инженерия және трибология» ғылыми-зерттеу орталығының ғалымдарына және «Физика және технология» кафедрасының барлық қызметкерлеріне докторантура оқу барысында көрсеткен қолдауы мен көмегі үшін үлкен ризашылығын білдіреді.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Wang Y., Cacciamani G. Thermodynamic modeling of the Al-Cr-Ni system over the entire composition and temperature range // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2016. – Vol. 688(B). – P. 422–435.
2. Grushko B., Przepiórzyński B., Kowalska-Strzęciwilk E., Surowiec M. New phase in the high-Al region of Al-Cr // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2006. – Vol. 420(1–2). – P. L1–L4.
3. Hu B., Zhang W.W., Peng Y., Du Y., Liu Sh., Zhang Y. Thermodynamic reassessment of the Al–Cr–Si system with the refined description of the Al–Cr system // *Thermochimica Acta*. – 2013. – Vol. 561. – P. 77–90.
4. Liang Y., Guo C., Li Ch., Du Zh. Thermodynamic modeling of the Al–Cr system // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2008. – Vol. 460(1–2). – P. 314–319.
5. Du Y., Clavaguera N. Thermodynamic assessment of the Al–Ni system // *Journal of Alloys and Compounds*. – 1996. – Vol. 237(1–2). – P. 20–32.
6. Huang W., Chang Y.A. A thermodynamic analysis of the Ni–Al system // *Intermetallics*. – 1998. – Vol. 6(6). – P. 487–498.
7. Ansara I., Dupin N., Lukas H.L., Sundman B. Thermodynamic assessment of the Al–Ni system // *Journal of Alloys and Compounds*. – 1997. – Vol. 247(1–2). – P. 20–30.
8. Dupin N., Ansara I., Sundman B. Thermodynamic re-assessment of the ternary system Al–Cr–Ni // *Calphad*. – 2001. – Vol. 25(2). – P. 279–298.
9. Zhang F., Chang Y.A., Du Y., Chen S.-L., Oates W.A. Application of the cluster-site approximation (CSA) model to the f.c.c. phase in the Ni–Al system // *Acta Materialia*. – 2003. – Vol. 51(1). – P. 207–216.
10. Pimenta A.R., Diniz M.G., Paciornik S., Sampaio C.A.F., Miranda M.S., Paolucci-Pimenta J.M. Mechanical and microstructural properties of a nickel-chromium alloy after casting process // *Revista Sul-Brasileira de Odontologia*. – 2012. – Vol. 9(1). – P. 17–24.
11. Alontseva D.L., Ghassemieh E., Dzhes A. The Application of Transmission Electron Microscopy to the Analysis of Powder Coatings Deposited on Metal Substrates by Plasma Method // *Acta Physica Polonica A*. – 2019. – Vol. 135(5). – P. 1113–1118.
12. Xiong W. Thermodynamic and Kinetic Investigation of the Fe–Cr–Ni System // *Doctoral Thesis*. – 2012. – KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
13. Gustafson A. Thermodynamic Evaluation of the Cr–Ni–W System // *Calphad*. – 1988. – Vol. 12(3). – P. 277–292.
14. Lee B.J. On the stability of Cr carbides // *Calphad*. – 1988. – Vol. 16(2). – P. 121–149.
15. Turchi P.E.A., Kaufman L., Kui Liu Z. Modeling of Ni–Cr–Mo based alloys: Part I—phase stability // *Calphad*. – 1988. – Vol. 30(1). – P. 70–87.
16. Raghavan V. Al–Cr–Ni (Aluminum–Chromium–Nickel) // *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*. – 2006. – Vol. 27(4). – P. 381–388.
17. Raghavan V. Al–Cr–Ni (Aluminum–Chromium–Nickel) // *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*. – 2008. – Vol. 29 – P. 175.

18. Cao W., Zhu J., Yang Y., Zhang F., Chen S., Oates W.A., Chang Y.A. Application of the cluster/site approximation to fcc phases in Ni–Al–Cr system // *Acta Materialia*. – 2005. – Vol. 53. – P. 4189–4197
19. Tu D.C. Doctoral Thesis, State Univ. Of New York at Stony Brook, 1982
20. Rosell-Laclau E., Durand-Charre M., Audier M. Liquid-Solid Equilibria in the Aluminum-Rich Corner of the Al–Cr–Ni System // *Journal of Alloys and Compounds*. – 1996. – Vol. 233. – P. 246–263.
21. Zajusz M., Bożek B., Tkacz-Śmiech K., Berent K., Danielewski M. Multiphase Ni–Cr–Al diffusion: experiment and simulations // *Defect and Diffusion Forum*. – 2016. – Vol. 369. – P. 77–82.
22. Saliesh M.M., Michael R.N. A. Review: Constitution of the Al–Cr–Ni System // *Materials Science and Engineering*. – 1984. – Vol. 66. – P. 47-60.
23. Kitajima Yu., Hayashi Sh., Narita T. Phase Equilibria of the Nickel-Aluminium-Chromium System at 1150°C // *Materials Science Forum*. – 2006. – Vol. 522–523. – P. 103–110.
24. Oforka N.C, Argent B.B. Thermodynamics of Ni–Cr–Al alloys // *Journal of the Less-Common Metals*. – 1985. – Vol. 114. – P. 97-109.
25. Nesbitt J.A., Heckel R.W. Interdiffusion in Ni-Rich, Ni–Cr–Al Alloys at 1100 and 1200 °C: Part I. Diffusion Paths and Microstructures // *Metallurgical Transactions A*. – 1987. – Vol. 18A. – P. 2061–2073.
26. Weitzer F., Xiong W., Krendelsberger N., Liu Sh., Du Y., Schuster J. C. Reaction Scheme and Liquidus Surface in the Al-Rich Section of the Al–Cr–Ni System // *Metallurgical and Materials Transactions A*. – 2008. – Vol. 39. – P. 2363–2369.
27. Grushko B., Kowalski W., Pavlyuchkov D., Przepiórzyński B., Surowiec M. A contribution to the Al–Ni–Cr phase diagram // *Journal of Alloys and Compounds*. – 1997. – Vol. 460(1–2). – P. 299–304.
28. Grushko B., Kowalski W., Pavlyuchkov D., Przepiórzyński B., Mi S., Surowiec M. Al-rich region of the Al–Ni–Cr alloy system below 900 °C // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2009. – Vol. 485(1–2). – P. 132–138.
29. Jaansalu K.M. Phase diagram modelling: Nickel-Aluminum-Chromium system // Ottawa: Air Vehicle Research Detachment, DCIEM, National Defence Headquarters. – 1998. – P. 39
30. Mueller E.M. Thermodynamic modelling and experimental analysis oxidation/sulfidation of Ni–Cr–Al model alloy coatings: дис. ... д-ра техн. наук. – Цюрих: ETH Zurich, 2007. – 185 б. – Diss. ETH №17007.
31. Wu K., Zhou N., Pan X., Morral J.E., Wang Y. Multiphase Ni–Cr–Al diffusion couples: A comparison of phase field simulations with experimental data // *Acta Materialia*. – 2008. – Vol. 56. – P. 3854–3861.
32. Huang W., Chang Y.A. Thermodynamic Properties of the Ni–Cr–Al System // *Intermetallics*. – 1999. – Vol. 7. – P. 863–84.
33. Broz P., Svoboda M., Bursik J., Kroupa A., Havrankova J. Theoretical and experimental study of the influence of Cr on the $\gamma + \gamma'$ phase field boundary in the Ni–Al–Cr system // *Materials Science and Engineering*. – 2002. – Vol. A325. – P. 59–65.

34. Fis O., Pa O., Er S. High Temperature Oxidation Resistance of Ni₂₂Cr₁₁Al Bond Coat Produced by Spark Plasma Sintering as Thermal Barrier Coatings // *Journal of Materials Science & Engineering*. – 2016. – Vol. 5(3). – P. 1000236.
35. Mohammad S. H., Ababtain M. A. Nano-Composites NiCrAl (MCrAl) Ternary Alloy Powder Synthesized by Mechanical Alloying // *Journal of Nano Research*. – 2009. – Vol. 6. – P. 169–176.
36. Шморгун В.Г., Трыков Ю.П., Богданов А.И., Арисова В.Н., Семакова Е.А. Структура и свойства покрытий из интерметаллидных Ni-Al соединений, полученных по комплексной технологии // *Известия ВолгГТУ*. – 2011. – № 5(78). – С. 8-11
37. Шморгун В.Г., Богданов А.И., Таубе А. Комплексная технология получения покрытий из алюминидов никеля на поверхности стальных изделий // *Известия вузов. Чёрная металлургия*. – 2014. – № 5. – С. 64-65.
38. Шморгун В.Г., Трыков Ю.П., Богданов А.И., Семакова Е.А. Комплексная технология получения покрытий на основе алюминидов никеля // XIX Менделеевский съезд по общей и прикладной химии (Волгоград, 25-30 сент. 2011 г.). В 4 т. Т. 2 / РАН, РХО им. Д.И. Менделеева, Администрация Волгогр. обл. [и др.]. - Волгоград, 2011. - С. 666
39. Шморгун В.Г. Трыков Ю.П., Богданов А.И., Гуревич Л.М. Влияние высокотемпературной термообработки на трансформацию структуры гибридных покрытий Ni/Ni₂Al₃ // *Известия ВолгГТУ*. – 2012. – № 9(96). – С. 50-54.
40. Liang G.Y., Su J.Y. The Microstructure and Tribological Characteristics of Laser-Clad Ni–Cr–Al Coatings on Aluminium Alloy // *Materials Science and Engineering: A*. – 2000. – Vol. 290(1–2). – P. 207–212.
41. Yang X., Zhou Y., Zhao M., Liu P., Qi H., Yang Y. Impact of Al Nanoparticles upon the Microstructure and Wear Properties of Ni-Cr-Al Nanocomposite Coatings // *Journal of the Indian Chemical Society*. – 2023. – Vol. 100(1). – P. 100822.
42. Zhao X., Dong T., Fu B., Li G., Liu Q., Li Y. Microstructure and Properties of Cold Sprayed NiCrAl Coating on AZ91D Magnesium Alloy // *Coatings*. – 2023. – Vol. 100(1). – P. 100822.
43. Thijs Nijdam, High-temperature oxidation of NiCrAl coating materials // graduation report. – 2001.
44. Yuan K., Eriksson R., Peng R., Li X.-H. Sten Johansson and Yandong Wang, Modeling of the microstructural evolution and lifetime prediction of MCrAlX coatings on Nickel based superalloys in high temperature oxidation // *Surface and Coatings Technology*. – 2013. – Vol. 15(232). – P. 204-215.
45. Foster J., Cameron B.P., Carew J.A. The Production of Multi-Component Alloy Coatings by Particle Codeposition // *Transactions of the IMF*. – 1985. – Vol. 63. – P. 115–119.
46. Honey F.J., Kedward E.C., Wride V. The Development of Electrodeposits for High-temperature Oxidation/Corrosion Resistance // *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*. – 1986. – Vol. 4. – P. 2593–2597.

47. Liu Z., Gao W., Karl L. D., Wang F. Improved Oxide Spallation Resistance of Microcrystalline Ni-Cr-Al Coatings // *Oxidation of Metals*. – 1998. – Vol. 50. – P. 51–69.
48. Seraffon M., Simms N.J., Sumner J., Nicholls J.R. Oxidation Behaviour of NiCrAl and NiCoCrAl Bond Coatings Under Industrial Gas Turbine Conditions // *Oxidation of Metals*. – 2013. – Vol. 81. – P. 203–215.
49. Seraffon M., Simms N.J., Sumner J., Nicholls J.R. The development of new bond coat compositions for thermal barrier coating systems operating under industrial gas turbine conditions // *Surface and Coatings Technology*. – 2011. – Vol. 206 (7). – P. 1529–1537.
50. Yang X., Peng X., Xu C., Wang, F. Electrochemical Assembly of Ni-xCr-yAl Nanocomposites with Excellent High-Temperature Oxidation Resistance // *Journal of The Electrochemical Society*. – 2009. – Vol. 156 (5). – P. 167
51. Oskay K.O., DemiRel B. Optimizing the composition of electroplated nicral composite coating // *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*. – 2018. – Vol. 36 (3). – P. 795–802.
52. Yang X., Zhou Y., Zhao M., Liu P., Qi H., Yang Y. Impact of Al Nanoparticles upon the Microstructure and Wear Properties of Ni-Cr-Al Nanocomposite Coatings // *Journal of the Indian Chemical Society*. – 2023. – Vol. 100 (1). – P. 100822.
53. Zhen H., Peng X. A new approach to manufacture oxidation-resistant NiCrAl overlay coatings by electrodeposition // *Corrosion Science*. – 2019. – Vol. 150. – P. 121–126.
54. Peng X., Zhen H., Tian L., Wang X., Wang K., Xie Y. A novel strategy to apply metallic nanoparticles to manufacture NiCrAl composite coatings smartly growing chromia and alumina // *Composites Part B: Engineering*. – 2022. – Vol. 234. – P. 109721.
55. Zhen H., Xie Y., Tian L., Peng X. Discontinuous oxidation in wet air of T91 with a novel Al₂O₃-forming NiCrAl nanocomposite coating in as-deposited and pre-oxidized states // *Surface and Coatings Technology*. – 2022. – Vol. 449. – P. 128937.
56. Yang L., Wu X., Weng D. Study of oxidation-resistant NiCrAl–Al coatings co-deposited by electrophoresis on nickel foams // *Scripta Materialia*. – 2006. – Vol. 55 (1). – P. 107–110.
57. Khakzadian J., Hosseini S.H., Madar K.Z. The effect of the substrate temperature on the microstructure properties of the NiCrAl coating in cathodic arc deposition // *Surface and Coatings Technology*. – 2018. – Vol. 337. – P. 342–348.
58. Mahesh R.A., Jayaganthan R., Prakash S. Evaluation of hot corrosion behaviour of HVOF sprayed NiCrAl coating on superalloys at 900 °C // *Materials Chemistry and Physics*. – 2008. – Vol. 111(2–3). – P. 524–533.
59. Mahesh R. A., Rengaswamy J., Prakash S. High temperature oxidation studies on HVOF sprayed NiCrAl coatings on superalloys // *Surface Engineering*. – 2011. – Vol. 27(5). – P. 332–339.
60. Mahesh R. A., Rengaswamy J., Prakash S. Evaluation of hot corrosion behaviour of HVOF sprayed Ni–5Al and NiCrAl coatings in coal fired boiler environment // *Surface Engineering*. – 2010. – Vol. 26(6). – P. 413–421.

61. Mahesh R. A., Rengaswamy J., Prakash S. Microstructural characteristics and mechanical properties of HVOF sprayed NiCrAl coating on superalloys // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2009. – Vol. 468 (1–2). – P. 392–405.
62. Ramesh M. R., Subba R.M., Kumar R.S, Durga P.C., Shrishail S. Cyclic Oxidation and Hot-Corrosion Behavior of HVOF-Sprayed NiCrAl Coating on Industrial Boiler Tube Steels // *JOM: the journal of the Minerals, Metals & Materials Society*. – 2024. – Vol. 76 (1–2). – P. 3172–3184.
63. Ramandhany S., Sugiarti E., Desiati R.D., Martides E., Junianto E., Prawara B., Sukarto A. The Effect of Silicon as a Reactive Element for NiCrAl Coating Performance on Hastelloy Substrate // *The 1st Materials Research Society Indonesia Conference and Congress* 8–12 October 2017. – P. 012017.
64. Siripongsakul T., Kettrakul P., Kanjanaprayut N., Promdirek P. Effect of Si Addition in NiCrAl Coating on Corrosion in Molten Nitrate Salt // *Materials*. – 2024. – Vol. 14 (8). – P. 902.
65. Aristu D., Carlos B.-L., Alberro M., Rández X., Fernández A.G. A comprehensive study on hot corrosion resistance of NiCoCrAlYTa and NiCrAl thermal-sprayed coatings for CSP applications Author links open overlay panel // *Journal of Energy Storage*. – 2023. – Vol. 74 (A). – P. 109346.
66. Sundararajan T., Kuroda S., Fujio A. Steam oxidation resistance of two-layered Ni–Cr and Al APS coating for USC boiler applications // *Corrosion Science*. – 2005. – Vol. 47 (5). – P. 1129–1147.
67. Zhang X.C., Liu C.J., Xuan F.Z., Wang Z.D., Tu S.T. Effect of NiCr and NiCrAl coatings on the creep resistance of a Ni alloy // *Materials Science and Engineering: A*. – 2011. – Vol. 528 (6). – P. 2282–2287.
68. Choi B.-Y., Liang J., Gao W. Correlation of Microstructure and High Temperature Oxidation Resistance of Plasma Sprayed NiCrAl, NiCrAlY, and TiAlO Composite Coatings on Ti-6Al-4V // *Metals and Materials International*. – 2005. – Vol.11. – P. 499–503.
69. Selman A., Cenk S., Hüseyin A. Investigation of the usability of biodiesel obtained from residual frying oil in a diesel engine with thermal barrier coating // *Applied Thermal Engineering*. – 2015. – Vol.88. – P. 212–219.
70. Richert M., Madej B. L., Nejman I.H., Zawadzka P., Pietrzyk S. Selection of protective coatings obtained by plasma spraying method for foundry industry // *Key Engineering Materials*. – 2016. – Vol.682. – P. 177–181.
71. Celik E., Ozdemir I., Avci E., Tsunekawa Y. Corrosion behaviour of plasma sprayed coatings // *Surface and Coatings Technology*. – 2005. – Vol. 193(1–3). – P. 297–302.
72. Li Q., Fan D., Xuan Y. Thermal radiative properties of plasma sprayed thermochromic coating // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2014. – Vol. 583. – P. 516–522.
73. Taymaz I., Cakir K., Mimaroglu A. Experimental study of effective efficiency in a ceramic coated diesel engine // *Surface and Coatings Technology*. – 2005. – Vol. 200. – P. 1182–1185.
74. Hejwowski T., Weroniski A. The effect of thermal barrier coatings on diesel engine performance // *Vacuum*. – 2002. – Vol. 65. – P. 427–432.

75. Cuong L.Q., Thu Q. L., Nguyen N.V., Nguyen T.A. High-temperature oxidation-resistant NiCr/Al duplex coating on carbon steel substrate // Vietnam Journal of Science and Technology. – 2020. – Vol. 58(1). – P. 21–30.
76. Астрабаб Е.В., Григорчик А.Н., Кукареко В.А., Белоцерковский М.А., Сосновский А.В. Структура, фазовый состав и триботехнические свойства подвергнутого отжигу (Ni-Cr)-Al композиционного покрытия // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2024. – № 3. – P. 99–108.
77. Chen Ch., Zhang M., Zhang Sh., Chang Q., Chen X. Study on NiCrAl Coating Alloyed on In718 Ni-Base Alloy by High-Energy Micro-Arc Alloying Processing // Advanced Science Letters. – 2011. – Vol. 6. – P. 996–1001.
78. Chen H., Wang K. Enhanced Mechanical, Electrochemical, and Passive Performance of Laser-Clad NiCrAl Coating by Laser Remelting // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2021. – Vol. 30. – P. 8426–8437.
79. Yu T., Xiong Y., Huang Sh., Tang H. Effect of Ta on oxidation behavior of laser clad Nisingle bondAl coating at 950 °C and 1050 °C in air // SSRN: <https://ssrn.com/abstract=4514528> . – 2023. – P. 1–13.
80. Xie Y., Wang M., Zhang G., Chang M. Analysis of superalloy turbine blade tip cracking during service // Engineering Failure Analysis. – 2006. – Vol. 13 (8). – P. 1429–1436.
81. Buyukkaya E., Demirkiran A., Cerit M. Application of Thermal Barrier Coating in a Diesel Engine // Key Engineering Materials. – 2004. – Vol. 264. – P. 517–520.
82. Ghadami F., Sabor Rouh Aghdam A., Ghadami S. Microstructural characteristics and oxidation behavior of the modified MCrAlX coatings: A critical review // Vacuum. – 2021. – Vol. 185. – P. 109980.
83. Sathish M., Radhika N., Saleh B. A critical review on functionally graded coatings: Methods, properties, and challenges // Composites Part B. – 2021. – Vol. 225. – P. 109278.
84. Latka L., Pawlowski L., Winnicki M., Sokolowski P., Malachowska A., Kozerski S. Review of functionally graded thermal sprayed coatings // Applied Sciences. – 2020. – Vol. 10. – P. 5153
85. Fethi R., Wei H., Saleh B., Radhika N., Jiang J., Ma A., Ahmed M. H., Li Q., Ostrikov K.K. Past and present of functionally graded coatings: Advancements and future challenges // Applied Materials Today. – 2022. – Vol. 26. – P. 101373.
86. Naebe M., Shirvanimoghaddam K. Functionally graded materials: a review of fabrication and properties // Applied Materials Today. – 2016. – Vol. 5. – P. 223–245.
87. Lee W.Y., Stionton D.P., Berndt C.C., Erdogan F., Lee Y.-D., Mustasim Z. Concept of functionally graded materials for advanced thermal barrier coating applications // Journal of the American Ceramic Society. – 1996. – Vol. 79(12). – P. 3003–3012.
88. Movchan B.A., Yakovchuk K.Y. Graded thermal barrier coatings, deposited by EB-PVD // Surface and Coatings Technology. – 2004. – Vol. 188. – P. 85–92.
89. Choi K.H., Kim H.-S., Park Ch. H., Kim G.-H., Baik K. H., Lee S. H., Kim T., Kim H. S. High-temperature thermo-mechanical behavior of functionally graded

materials produced by plasma sprayed coating: Experimental and modeling results // Metals and Materials International. – 2016. – Vol. 22. – P. 817–824.

90. Kawasaki A., Watanabe R. Evaluation of thermomechanical performance for thermal barrier type of sintered functionally graded materials // Composites Part B: Engineering. – 1997. – Vol. 28 (1-2). – P. 29–35.

91. Kim J.H., Kim M.C., Park C.G. Evaluation of functionally graded thermal barrier coatings fabricated by detonation gun spray technique // Surface and Coatings Technology Engineering. – 2003. – Vol. 168 (2-3). – P. 275–280.

92. Bao Z.B., Wang Q.M., Li W.Z., Liu X., Gong J., Xiong T.Y., Sun C. Preparation and hot corrosion behaviour of an Al-gradient NiCoCrAlYSiB coating on a Ni-base superalloy // Corrosion Science. – 2009. – Vol. 51 (4). – P. 860–867.

93. Li J.Q., Gu K.M., Tang J. N., Xie S.H., Zhuang Y.H. Al_2O_3 –NiCrAl composites and functional gradient materials fabricated by reactive hot pressing // Materials Chemistry and Physics. – 2006. – Vol. 97(1). – P. 31–36.

94. Pan Ch., Xu X. Microstructural characteristics in plasma sprayed functionally graded ZrO_2 /NiCrAl coatings // Surface and Coatings Technology. – 2003. – Vol. 162 (2). – P. 194–201.

95. Tekmen C., Ozdemir I., Celik E. Failure behaviour of functionally gradient materials under thermal cycling conditions // Surface and Coatings Technology. – 2003. – Vol. 174. – P. 1101–1105.

96. Cetinel H., Uyulgan B., Tekmen C., Ozdemir I., Celik E. Wear properties of functionally gradient layers on stainless steel substrates for high temperature applications // Surface and Coatings Technology. – 2003. – Vol. 174. – P. 1089–1095.

97. Celik E., Birlik I., Karakas Y. Synthesis of NiCrAl/MgO– ZrO_2 cermet powders by chemical method for functionally graded coatings // Journal of Materials Processing Technology. – 2009. – Vol. 209(2). – P. 695–699.

98. Wang L., Zhang L., Huang Q., Zhang Ch. Characterization and Corrosion Behavior to Molten Zinc of TiAl–Nb/NiCrAl Gradient Coatings // Journal of Thermal Spray Technology. – 2023. – Vol. 32(4). – P. 2491–2506.

99. Kim J.H., Kim M.C., Park C.G. Evaluation of functionally graded thermal barrier coatings fabricated by detonation gun spray technique // Surface and Coatings Technology. – 2003. – Vol. 168. – P. 275–280.

100. Wu Y.N., Wang F.H., Hua W.G., Gong J., Sun C., Wen L.S. Oxidation behavior of thermal barrier coatings obtained by detonation spraying // Surface and Coatings Technology. – 2003. – Vol. 166. – P. 189–194.

101. Wu Y.N., Ke P.L., Wang Q.M., Sun C., Wang F.H. High temperature properties of thermal barrier coatings obtained by detonation spraying // Corrosion Science. – 2004. – Vol. 46. – P. 2925–2935.

102. Stathopoulos V., Sadykov V., Pavlova S., Bepalko Y., Fedorova Y., Bobrova L., Salanov A., Ishchenko A., Stoyanovsky V., Larina T., Ulianitsky V., Vinokourov Z., Kriventsov V. Design of functionally graded multilayer thermal barrier coatings for gas turbine application // Surface and Coatings Technology. – 2016. – Vol. 295. – P. 20–28.

103. Ulianitsky V.Y., Dudina D.V., Shtertser A.A., Smurov I., Computer-controlled detonation spraying: flexible control of the coating chemistry and microstructure // *Metals*. – 2019. – Vol. 9. – P. 1244.
104. Shtertser A.A., Batraev I.S., Ulianitsky V.Yu., Kuchumova I.D., Bulina N.V., Ukhina A.V., Bokhonov B.B., Dudina D.V., Trinh Ph.V., Phuong D. D. Detonation spraying of Ti-Cu mixtures in different atmospheres: carbon, nitrogen and oxygen uptake by the powders // *Surfaces and Interfaces*. – 2020. – Vol. 21. – P. 100676.
105. Ulianitsky V. Y., Rybin D. K., Ukhina A. V., Bokhonov B. B., Dudina D. V., Samodurova M. N., & Trofimov E. A. Structure and composition of Fe-Co-Ni and Fe-Co-Ni-Cu coatings obtained by detonation spraying of powder mixtures // *Materials Letters*. – 2021. – Vol. 290. – P. 129498.
106. Ульяницкий В. Ю. CCDS2000 – оборудование нового поколения для детонационного напыления // *Упрочняющие технологии и покрытия*. – 2013. – Вып. 10(106). – С. 36–41.
107. Nikolaev Y.A., Vasiliev A.A., Ulianitsky V.Yu. Gas detonation and its application in engineering and technologies (Review), *Combustion // Explosion and Shock Waves*. – 2003. – Vol. 39. – P. 382–410.
108. ГОСТ Р ИСО 6507-1. Металлы и сплавы. Измерение твердости по Виккерсу. Часть 1. Метод измерения от 29 ноября 2007 г.
109. ГОСТ Р 8.748-2011. Металлы и сплавы. Измерение твердости и других характеристик материалов при инструментальном индентировании. Часть 1. Метод испытаний от 13 декабря 2011.
110. ASTM G99-05. Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus; ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2005. Available online: <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?G99-05> (accessed on).
111. ISO 13565-1:1996. Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: Profile method – Surfaces having stratified functional properties – Part 1: Filtering and general measurement conditions: International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 1996. Available online: <https://www.iso.org/standard/23261.html> (accessed on).
112. Rutkowska-Gorczyca M., Wiśniewski M., Dziubek M. etc. Tribological wear analysis of Ti-Al composite coatings applied with the cold spray method // *Tribologia*. – 2023. – Vol. 3. – P. 63–70.
113. ISO 14916:2017. Thermal spraying — Determination of tensile adhesive strength. International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2017. Available online: <https://www.iso.org/standard/60995.html> (accessed on).
114. ISO 1302:2002. Indication of surface texture in technical product documentation. International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2002. Available online: <https://www.iso.org/standard/16399.html> (accessed on).
115. Ghadami F., Davoudabadi M.A., Ghadami S. Cyclic Oxidation Properties of the Nanocrystalline AlCrFeCoNi High-Entropy Alloy Coatings Applied by the Atmospheric Plasma Spraying Technique // *Coatings*. – 2022. – Vol. 12(3). – P. 372.
116. Manpreet K., Harpreet S., Satya P. High-Temperature Behavior of a High-Velocity Oxy-Fuel Sprayed Cr₃C₂-NiCr Coating // *Metallurgical and Materials Transactions A*. – 2012. – Vol. 43(8). – P. 2979-2993.

117. Liu Zh., Gao W., Dahm K.L., Wang F. Improved Oxide Spallation Resistance of Microcrystalline Ni-Cr-Al Coatings // *Oxidation of Metals*. – 1998. – Vol. 50. – P. 51-69.
118. Kaushal G., Singh H., Prakash S. Performance of detonation gun-sprayed Ni-20Cr coating on ASTM A213 TP347H steel in a boiler environment // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2012. – Vol. 21. – P. 975-986.
119. Jinag S.M., Li H.Q., Ma J., Xu C.Z., Gong J., Sun C. High temperature corrosion behaviour of a gradient NiCoCrAlYSi coating II: Oxidation and hot corrosion // *Corrosion Science*. – 2010. – Vol. 52(7). – P. 2316-2322.
120. ISO 20808:2016. Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics) — Determination of friction and wear characteristics of monolithic ceramics by ball-on-disc method. International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2016. Available online: <https://www.iso.org/standard/60995.html> (accessed on).
121. Maulet M., Rakhadilov B.K., Sagdoldina Zh.B., Kassymov A.B., Kakimzhanov D.N. Influence of the detonation-spraying mode on the phase composition and properties of Ni-Cr coatings // *Eurasian Journal of Physics and Functional Materials*. – 2020. – № 4 (3). – P. 249-254.
122. Maulet M., Rakhadilov B., Stepanova O., Sagdoldina Zh., Kassymov A., Kakimzhanov D. Structure, Hardness and Wear Resistance of the Ni-Cr-Al Detonation Coating // *IEEE 10th Int. Conf. «Nanomaterials: Applications & Properties» (NAP-2020)*. – Sumy, 2020. – Vol. 1. – P. 01TFC17
123. Рахадиллов Б.К., Маулет М., Кайратова Н.К. Особенности формирования структуры и свойств детонационных покрытий Ni-Cr-Al в зависимости от режима детонационного напыления // *Межд. науч.-прак. конф. «Традиционная и инновационная наука: история, современное состояние, перспективы»*. – г. Волгоград, 2022. – С. 78-81.
124. Rakhadilov B., Maulet M., Abilev M., Sagdoldina Zh., Kozhanova R. Structure and Tribological Properties of Ni-Cr-Al Based Gradient Coating Prepared by Detonation Spraying // *Coatings*. – 2021. – Vol. 11(2). – P. 218.
125. Rakhadilov B., Maulet M., Kakimzhanov D.N., Stepanova O.A., Botabaeva G.B. Comparative study of the structure and properties of homogeneous and gradient Ni-Cr-Al coatings // *Eurasian Journal of Physics and Functional Materials*. – 2022. – Vol.6(1). – P. 47-55.
126. Maulet M., Sagdoldina Zh.B., Rakhadilov B.K., Kakimzhanov D.N., Magazov N.M. Influence of the content of aluminum on the structure of gradient detonation coatings based on NiCr-Al // *Bulletin of Karaganda University*. – 2022. Vol.3(107). – P.18-24.
127. Рахадиллов Б.К., Маулет М., Кайратова Н.К. Получение многослойного градиентного покрытия Ni-Cr-Al методом детонационного напыления // *Межд. Науч.-прак. конф. «Актуальные научные исследования»*. – г. Пенза, 2022. – С. 206-209.
128. Maulet M., Wieleba W. Impact of aluminum content upon the microstructure of Ni-Cr-Al gradient coatings // *Int. Prac. Conf. «Chakkenges of Science»*. – Almaty, 2023. – P. 233-236.

129. Maulet M., Sagdoldina Zh., Çoruh A., Alibekova A. B. Investigation of tribological properties of detonation Ni-Cr-Al coatings // Bulletin of Shakarim University. Technical sciences. – 2024. – №4(16). – С. 355-360.
130. Маулет М., Рахадиллов Б., Сағдолдина Ж., Какимжанов Д. Біртекті және градиентті NiCr-Al жабындарының құрылымы мен қасиеттерін салыстырмалы зерттеу // Халық. Ғыл.-Тәж. Конф. «Уәлиев оқулары-2022». – Өскемен қ., 2022. – Б. 373-378.
131. Пат. 8922 ҚР. Функциональды-градиентті жабынды алу тәсілі / Б.К. Рахадиллов; Ж.Б. Сағдолдина; М. Маулет; Д.Б. Буйткенов; Л.Г. Сулюбаева; жарияланды 07.03.2024.
132. Rakhadilov B., Sulyubayeva L., Maulet M., Sagdoldina Zh., Buitkenov D., Issova A. Investigation of high-temperature oxidation of homogeneous and gradient Ni-Cr-Al coatings obtained by detonation spraying // Coatings. – 2024. – Vol. 14(11). – P. 1-11.
133. Маулет М., Велеба В., Рахадиллов Б.К., Сағдолдина Ж.Б., Райсов Н.С. 12Х1МФ ыстыққа төзімді жабындарының жоғары температуралық қасиеттері // Торайғыров университетінің, Энергетикалық сериясы. – 2023. Vol.4. – P.226-236.
134. Маулет М., Рахадиллов Б.К., Сағдолдина Ж.Б., Райсов Н.С. Исследование свойств жаростойких покрытий на основе Ni-Cr-Al, полученных методом детонационного напыления // Междунар. науч.-тех. молод. конф. «Перспективные материалы конструкционного и функционального назначения». – г. Томск, 2023. – С. 311-313
135. Maulet M., Rakhadilov B.K., Wieleba W., Sagdoldina Zh. B. Utilizing detonation spraying in the process of fortifying components within power plant technology // Int. sci & prac. Conf. «Integration of power and mechanical engineering: innovative technologies and practices». – Almaty, 2023. – P. 49-52.
136. Maulet M., Rakhadilov B., Rutkowska-Gorczyca M., Sagdoldina Zh., Buitkenov D. Assessment of Ni-Cr-Al high-temperature detonation coatings under operational conditions // Vestnik Toraigyrov universiteta. Energy Series. – 2024. – Vol.4. – P. 231-241.
137. Maulet M., Azlan M.N., Bolatov S., Alibekova A.B. Durability and corrosion behavior of Ni-Cr-Al detonation coatings under Na₂SO₄/NaCl exposure // Bulletin of Shakarim University. Technical sciences. – 2024. – №4(16). – P. 389-394.
138. Маулет М., Сағдолдина Ж.Б., Әлібекова Б.Ә. Детонациялық бүрку әдісімен алынған Ni-Cr-Al жабындарының жоғары температураға төзімділігін зерттеу // XVI Халық. Ғыл. Конф. Қатты дене физикасы», 2025. – Б. 173-176.

ҚОСЫМША А

Пайдалы модельге патент «Функционалды-градиентті жабын алу тәсілі»

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН

REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

ПАТЕНТ
PATENT

№ 8922

ПАЙДАЛЫ МОДЕЛЬГЕ / НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ / FOR UTILITY MODEL



(21) 2023/1087.2

(22) 31.10.2023

(45) 07.03.2024

(54) Функционалды-градиентті жабынды алу тәсілі
Способ получения функционально-градиентного покрытия
Method of obtaining functionally gradient coating

(73) «PlasmaScience» жауапкершілігі шектеулі серіктестігі (KZ)
Товарищество с ограниченной ответственностью «PlasmaScience» (KZ)
«PlasmaScience» Limited Liability Partnership (KZ)

(72) Рахадиллов Бауыржан Корабаевич (KZ) Rakhadilov Bauyrzhan Korabayevich (KZ)
Сағдолдина Жұлдыз Болатқызы (KZ) Sagdoldina Zhuldyz Bolatkyzy (KZ)
Маулет Меруерт (KZ) Maulet Meruert (KZ)
Буйткенов Дастан Болатұлы (KZ) Buitkenov Dastan Bolatuly (KZ)
Сүлюбаева Лайла Гылыммеденовна (KZ) Sulubayeva Laila Gylymmeddenovna (KZ)



ЭЦК қол қойылды
Подписано ЭЦП
Signed with EDS

Е. Оспанов
Е. Оспанов
Y. Ospanov

«Ұлттық зияткерлік меншік институты» РМК директоры
Директор РГП «Национальный институт интеллектуальной собственности»
Director of RSE «National institute of intellectual property»

ҚОСЫМША Ә

Ғылыми-зерттеу жұмысының нәтижесін оқу үрдісіне енгізу

НАО «ВОСТОЧНО-КАЗАХСТАНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ САРСЕНА АМАНЖОЛОВА»

СОГЛАСОВАНО

Директор департамента академической
политики и управления
образовательными программами

 Е. Домалатов
«11» сентября 2024 г.

УТВЕРЖДАЮ

Член правления-проректор
по академическим вопросам
НАО «Восточно-Казакстанский
университет имени Сарсена Аманжолова»

 Н.Б. Алимбекова
«11» сентября 2024 г.

АКТ внедрения результатов научно-исследовательской работы в учебный процесс

Мы, нижеподписавшиеся, Хамитова З.К – руководитель отдела по организации учебно-методической работы; Адиканова С.К – декан Высшей школы IT и естественных наук; зав. кафедрой физики и технологий – Баймолданова Л.С.; Буйткенов Д.Б., Сагдолдина Ж.Б. Маулет М. – разработчики научно-исследовательской работы, составили настоящий акт внедрения результатов научно-исследовательской работы «Детонационное напыление порошковых покрытий».

Описание объекта внедрения: Нанесение порошковых покрытий проводится в Научно-исследовательском центре «Инженерия поверхности и трибология» на детонационной установке CCDS2000. Комплекс детонационного напыления CCDS2000 предназначен для организации технологического участка нанесения газотермических порошковых покрытий из керамики, металлов, металлокерамики, цель которых восстановить и/или обеспечить заданные эксплуатационные свойства деталей и узлов машин: износостойкость, жаростойкость, коррозионную стойкость и др. Комплекс состоит из детонационной пушки, порошковых дозаторов, панели манометров, блока управления и системы охлаждения. Детонационное напыление покрытий из порошков основано на использовании энергии взрыва топливо-кислородной смеси и известно, как перспективный способ получения покрытий из различных материалов с хорошей адгезией. Более высокая скорость полета частиц позволяет обеспечить более высокой плотности и адгезионной прочности детонационного покрытия. Ключевым преимуществом метода детонационного напыления является возможность точного регулирования количества взрывчатой газовой смеси, используемой для каждого выстрела детонационной пушки, что позволяет изменять степень теплового и химического воздействия продуктов детонации на частицы напыляемого порошка. В зависимости от состава ацетилен-кислородной взрывчатой смеси, от соотношения O_2/C_2H_2 и от природы газаносителя между отдельными фазами композиционных частиц могут протекать химические взаимодействия. В процессе детонационного нанесения покрытий мелкодисперсные металлические или неметаллические материалы осаждаются в расплавленном или полурасплавленном состоянии с образованием покрытия на поверхность обрабатываемого материала.

Наименование объекта и предмета внедрения результатов научно-исследовательской работы: объект внедрения – технология детонационного напыления порошковых покрытий, предмет внедрения – установка детонационного напыления CCDS2000.

Указанная работа внедрена в учебный процесс в 2024 году в практические занятия по дисциплинам: «Композиционные материалы», «Металловедение и термическая обработка материалов», «Новые технологии и композиционные материалы», «Фазовые и

структурные превращения в конденсированном состоянии», «Технологии обработки материалов».

Социально-педагогический и экономический эффект внедрения: научно-исследовательские результаты этого направления открывают новые возможности для использования технологических преимуществ метода воздушно-плазменного напыления в стратегически важных отраслях промышленности. Научная новизна и практическая значимость исследования для Казахстана очевидны. В первую очередь, это создание новой области технологических знаний в области обработки поверхности методом нанесения порошковых покрытий. Это в свою очередь, позволит не только форсировать расширение технологий получения порошковых покрытий, но и повысить уровень подготовки специалистов по специальностям 6B05305 – «Прикладная физика, наноматериалы и инноватика», 7M05301 – «Физика», 8D05301 – «Физика», 6B05303 – «Ядерная физика и атомная энергетика», 6B07102 – «Программирование и аппараты в обработке материалов и машиностроении».

Материалы к настоящему акту рассмотрены на заседании кафедры физики (протокол №1 от 04 сентября 2024 г.).

Руководитель отдела по
организации учебно-методической работы

З. Хамитова

Декан Высшей школы IT и естественных наук

С. Адиканова

Зав. кафедрой физики и технологий

Л. Баймолданова

Разработчики НИР:

Д. Буйткенов

Ж. Сагдолдина

М. Маулет