

**Мұсахан Н.П.¹, Курбанбеков Ш.Р.¹, Балтабаева Д.Э.¹,
Камбарбеков С.Х.¹**

¹Қ.А. Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті,
Түркістан қ., Қазақстан

65Г БОЛАТЫНА АРНАЛҒАН ZrCN ЖАБЫНДАРЫНЫҢ ФИЗИКА-МЕХАНИКАЛЫҚ ЖӘНЕ МОРФОЛОГИЯЛЫҚ ТҰРАҚТЫЛЫҒЫН ЗЕРТТЕУ

Түйіндеме. Бұл мақалада ZrCN негізіндегі жабындарының 65Г болатына арналған физика-механикалық және морфологиялық тұрақтылығын зерттеу нәтижелері ұсынылған. Зерттеу нәтижелері ZrCN негізіндегі керамикалық жабындардың жоғары термиялық тұрақтылыққа және физика-химиялық әсерлерге төзімділікке ие екенін көрсетті, бұл оларды экстремалды жағдайда жұмыс істейтін металл бөлшектер мен кесу құралдарына арналған тиімді қорғаныш жабын ретінде қолдануға мүмкіндік беретіндігімен ерекшеленеді. Зерттеудің мақсаты мақта тазалау машиналарының ара дискілерінде қолданылатын 65Г болаты негізіндегі бөлшектердің тозуға төзімділігін арттыру мақсатында жоғары жылдамдықты оттегі-отын бүрку (ЖЖООБ) технологиясы арқылы алынған ZrCN жабындарының құрылымдық-фазалық және трибологиялық қасиеттерін зерттеу болып табылады. 65Г болатына үш түрлі режимде ZrCN жабындары жағылып, олардың микроқаттылығы мен үйкеліс коэффициенті анықталды. Нәтижесінде, жабын алынған үш үлгінің микроқаттылығының орташа мәні 1661,7 HV құрады және бұл жабындардың түпнұсқа болатқа қарағанда шамамен 3,5 есе жоғары қаттылық көрсетті. Сканерлеуші электронды микроскопиясы (СЭМ) арқылы жабынның морфологиясы, тығыздығы және өтпелі қабаттың құрылымы сипатталып, төмен кеуектілікке қол жеткізілгені расталды. «Шар–диск» схемасы бойынша жүргізілген үйкеліс сынақтары жабынның тозуға төзімділігін және түпнұсқаны тиімді қорғау қабілетін көрсетті. Бұл зерттеу ЖЖООБ әдісімен алынған ZrCN жабындарының ауыл шаруашылығы техникасында қолданылатын бөлшектердің қызмет ету мерзімін арттыруда перспективалы шешім бола алатынын дәлелдейді.

Түйінді сөздер: микроқаттылық, ЖЖООБ, үйкеліс коэффициенті, трибология, ZrCN жабыны, сканерлеуші электронды микроскопия.

Кіріспе. Әртүрлі инженерлік қолданбаларда, тозуға төзімді өрі жоғары беріктікке ие материалдарға деген сұраныс айтарлықтай артуда. Қазіргі таңда, ауыл шаруашылығы өндірісінде жер жырту және кесу құралдарында, сонымен қатар, мақта тазалау машиналары ара дискілерінің мерзімінен бұрын істен шығуы көбіне олардың тозуға төзімділігінің жеткіліксіздігіне байланысты,

бұл олардың жұмыс істеу мерзімі мен тиімділігін төмендетеді. Осыған байланысты, 65Г болаты жоғары беріктігі мен төзімділігіне байланысты мақта мен топырақпен жанасатын бөлшектерді жасау үшін жиі қолданылады [1]. Дегенмен, ауыл шаруашылығы техникасы ауыр жұмыс жағдайында пайдаланылатындықтан және қатты тозуға ұшырайтындықтан, тозған бөлшектерді жыл сайын көп мөлшерде ауыстыруға тура келеді, бұл өз кезегінде өндіріс шығындарының артуына себеп болады [2].

Осыған байланысты көптеген зерттеушілер 65Г болатының үйкеліс пен тозуға төзімділік қасиеттерін арттыру мақсатында, қазіргі уақытта көңінен қолданылатын беттік өңдеу технологияларын доғалық бүрку [3,4], вакуумдық және лазерлік қаптау [5,6], магнетронды тозаңдату [7,8], сондай-ақ дәстүрлі термиялық өңдеу тәрізді әртүрлі технологияларды жан-жақты зерттеген. Бұл беткі өңдеу тәсілдері материалдың қаттылығы мен беріктігін және тозуға төзімділігін белгілі бір деңгейде жақсартқанымен, күтілген нәтижелерге толық жете алмағандығын көрсетеді. Өңдеу әсері тұрақты емес, ал алынған беткі қабаттың құрылымы түпнұсқамен үйлеспейтіндігін алға тартады. Мұндай кемшіліктер 65Г болатының жалпы жұмыс өнімділігіне теріс әсерін тигізіп, оның қызмет ету мерзімін арттыруға мүмкіндік бермейді.

Жоғарыда келтірген жабын алу әдістерінің ішінде ең тиімді әрі болашағы зор деп саналатыны – жоғары жылдамдықты оттегі-отын бүрку технологиясы, бұл тығыздығы жоғары, тозуға төзімді жабындар алу үшін қолданылатын термиялық бүрку процесі. Бұл әдісте жану камерасында отын (пропан) мен оттегінің қоспасы жанып, жоғары температуралы және жоғары қысымды жалын түзіледі. Бұл жалын арнайы саптама арқылы өтіп, аса жоғары жылдамдықтағы газ ағынына айналады. Жабын ұнтағы осы ағынға енгізіліп, қыздырылып, өте жоғары жылдамдықпен бетке бағытталады. Бөлшектер бетке соғылып, жайылып, тез салқындап, берік әрі тығыз қабат түзеді. Нәтижесінде жабын тозуға және коррозияға төзімділігі жоғары, кеуектілігі төмен болып шығады.

ЖЖООБ технологиясы, ол наноқұрылымды жабындар қалыптастыруға жол ашады. Жоғары сапалы жабындарды үнемді және тиімді жолмен алуға мүмкіндік беретін бұл технология бүгінде жабын алумен айналысатын көптеген өнеркәсіп салаларында кең ауқымда пайдаланылады [9-11]. HVOF әдісімен алынған жабындардың физикалық және механикалық қасиеттері көбіне олардың нано-немесе микроқұрылымымен анықталады. Бұл құрылым бөлшектердің түпнұсқаға түсу сәтіндегі физикалық және химиялық параметрлерге – жылдамдық, температура, балқу дәрежесі мен тотықтырғыш құрамына тәуелді түрде қалыптасады [12,13].

Тозуға, қатты механикалық күштерге және химиялық агрессивті ортаға қарсы тұра алатын жабындардың маңыздылығы ерекше. Бұл бағытта ZrCN жабындары мұндай экстремалды жағдайларда өз тиімділігін жоғары деңгейде екендігі көрсетілген [14-17]. Зерттеу нәтижелері бойынша ZrCN негізіндегі керамикалық жабындар жоғары термиялық тұрақтылықпен және физика-

химиялық әсерлерге жоғары төзімділікпен ерекшеленетіні анықталған, бұл оларды аса ауыр жағдайларда жұмыс істейтін металл бөлшектер мен кесу құралдары үшін тиімді қорғаныш жабын ретінде пайдалануға мүмкіндік береді [18]. Сонымен қатар, зерттеу нәтижесінде ZrN/ZrCN жабындарының түйіршіктері Zr/ZrN жабындарымен салыстырғанда ұсақ, тығыз әрі біртекті болып қалыптасатыны белгілі болды. Бұл өз кезегінде ZrN/ZrCN жабындарының қаттылығы, серпімділік модулі және H/E қатынасы жағынан жоғары көрсеткіштерге ие екенін көрсетті [19].

Зерттеудің мақсаты. Мақта тазалау машиналарының ара дискілерінің жұмыс тиімділігін арттыру және тозуға төзімділігін жоғарылату мақсатында 65Г болаты негізіндегі бөлшектерге арналған қорғаныш жабын ретінде ЖЖООБ әдісімен алынған ZrCN жабындарының құрылымдық-фазалық ерекшеліктерін, физика-механикалық қасиеттерін зерттеу және олардың жұмыс ортасына төзімділігін бағалау.

Материалдар мен зерттеу әдістері. Зерттеу барысында бастапқы үлгі ретінде жоғары көміртекті және қоспаланған болаттар қатарына жататын, 15x20x4мм өлшемге ие 65Г [ГОСТ 14959-79] маркалы болат қолданылды. Оның химиялық құрамы (салмақ үлесі, %) C 0.62-0.70, Si 0.17-0.37, Mn 0.90–1.20, S≤0.035, P≤0.035, Cr≤0.25, Ni≤0.30, Cu≤0.25 және қалғаны Fe [20]. Бұрку процесіне дейін үлгінің беткі қабаты тотығу қабықтарынан тазарту үшін механикалық түрде тегістеліп өңделді, кейіннен жабынның жақсы жабысып бекінуін қамтамасыз ету үшін құммен үрлеу камерасында өңдеу жүргізілді.

Біртекті ZrCN негізіндегі жабындарын алу үшін автоматтандырылған ЖЖООБ технологиясы арқылы Termika-3 қондырғысында жағылды. Бұл қондырғының басқару панелі берілетін газдардың қысымын дәл орнатуға мүмкіндік береді. Қысым көтерілген кезде газдар камера ішінде араласып, мөлшермен берілетін ұнтақ материал жандырғышқа жеткізіледі. Мұнда ұнтақ бөлшектері компрессор арқылы берілетін сығылған ауамен тасымалданады. Жандырғыштың шығу бөлігінде бөлшектер жалын аймағына түсіп, пластикалық деформацияға мүмкіндік беретін температураға дейін қызады. Балқыған бөлшектер алдын ала дайындалған түпнұсқа бетіне бағыттталып, біркелкі қорғаныш жабынды қалыптастырады [21]. Бұрку процесінің негізгі параметрлері 1-кестеде келтірілген.

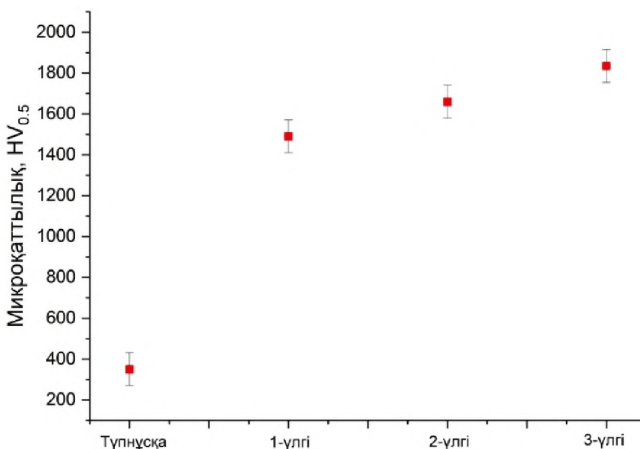
1-кесте - Үлгі бетіне жабын алу параметрлері

№	Арақашықтық	Газ (Пропан, бар)	Ауа қысымы (бар)	Оттегі (бар)	Ұнтақ
1-Үлгі	35-40 см	1,7	2,4	2,8	ZrCN
2-Үлгі	35-40 см	1,7	2,8	2,8	ZrCN
3-Үлгі	35-40 см	1,7	3,8	2,8	ZrCN

Үлгілерге жабынды жағуға дейін және одан кейін қаттылықты анықтау мақсатында ГОСТ 9450-76 стандартына сәйкес Виккерс бойынша қаттылығын өлшеу жүргізілді. Бұл сынақ HLV-1DT микроқаттылықты өлшеу құрылғысымен орындалды. Сынақ кезінде үлгі бетіне уақыт межесі 10 секунд болатын, бұрыштары 136° жасайтын алмаз индентордың көмегімен $HV_{0.5}$ жүктемесі түсірілді. Сынақтың басты мақсаты – HVOF жабынды жағу нәтижесінде үлгі бетінің микроқаттылығын анықтау.

Жабын алынған үлгідердің үйкеліс пен тозуға арналған сынақтары ASTM G99 стандартына сәйкес TRB-3 трибометр құрылғысында «шар–диск» схемасы арқылы жүргізілді. Сынақ жүргізу барысында келесі параметрлер қолданылды: қалыпты күш – 5 Н, сырғу жылдамдығы – 2 см/с, қарсы элемент ретінде диаметрі 6 мм болатын 100Cr6 болат шары пайдаланылды, ал жалпы сырғу жолы – 30 м. Сынақ құрғақ үйкеліс жағдайында өткізілді.

Нәтижелер және талқылау. Жабындар мен үлгілердің микроқаттылығы – олардың механикалық беріктігі мен жұмыс істеу қабілетін анықтайтын негізгі көрсеткіштердің бірі болып табылады. 1-суретте жабын мен үлгі арасындағы Виккерс микроқаттылығының таралуы көрсетілген. Жабынның қаттылығы үлгінікіне қарағанда шамамен 3,5 есе жоғары екендігі байқалды. Бұл көрсеткіштер негізгі материалдың қаттылығы жағынан жабындарға қарағанда әлдеқайда төмен екенін аңғартады және тозуға төзімділікті арттыру үшін қорғаныш жабындарды қолданудың өзектілігін көрсетеді.



1-сурет - 65Г болатының микроқаттылық мәндері. HVOF бүрку режимдері 1-кестеде көрсетілген.

ZrCN жабындарын жағу нәтижесінде микроқаттылықтың айтарлықтай артқаны байқалады, бұл көрсеткіш әр түрлі үлгілерде әрқалай мәнге ие. Ауа қысымы 2.4 бар болатын 1-үлгіде орташа микроқаттылық 1490 HV деңгейіне

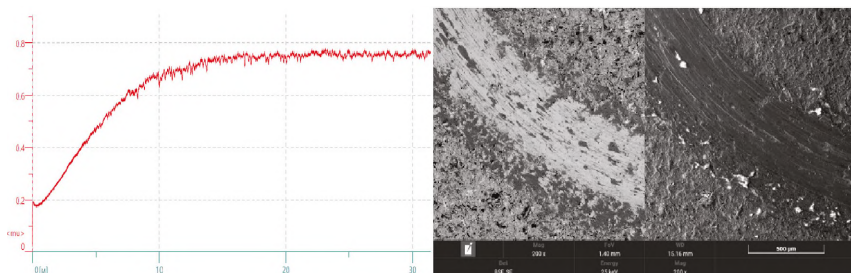
жетіп, бөлшектердің жоғары тығыздалуын және жабынның біртекті құрылымын көрсетеді. Сондай-ақ, ауа қысымы 2.8 болған 2-үлгіде орташа микроқаттылығы 1660 HV екендігі тіркелген, бұл жабынның механикалық беріктігінің жоғары екенін айғақтайды. Ал, ауа қысымы 3.8 бар болған 3-үлгінің орташа мәні ең жоғары – 1835 HV қаттылық мәнін көрсетіп, бұл жабын бөлшектерінің оңтайлы өлшеміне, фазалардың біркелкі таралуына және төмен кеуектілікке байланысты болуы мүмкін. Жабын мен түпнұсқа шекарасында микроқаттылықтың біртіндеп өзгеруі байқалады, бұл бүрку процесі кезінде қорытпа элементтерінің диффузиясы мен температуралық әсерлердің болуы мүмкін екендігін білдіреді.

СЭМ материалдардың микроқұрылымын жоғары дәлдікпен зерттеуге мүмкіндік беретін әдіс болып табылады. Бұл микроскопия түрі арқылы үлгінің морфологиялық ерекшеліктері, атап айтқанда түйіршіктердің пішіні мен өлшемі, кеуектілік, фазалық шекаралар сияқты микроқұрылымдық сипаттамалар анықталады [22]. Әртүрлі режимдерде, мысалы, SE (екіншілік электрондар) және BSE (артқа шашыраған электрондар) арқылы рельеф пен химиялық контраст көрсетіледі. Жалпы алғанда, СЭМ әдісі жабындардың сапасын бағалау және материалтану саласындағы құрылымдық-функционалдық байланыстарды анықтау үшін маңызды құрал болып табылады [23].

ЖЖООБ технологиясы арқылы алынған ZrCN негізіндегі жабындардың 1-үлгі параметріне сәйкес, үйкеліс пен тозуға арналған зерттеу нәтижесі бастапқы кезеңде (0-10 м) үлгі үйкеліс коэффициентінің шамамен 0-ден 0.9036-ке дейін ұлғаюын көрсетеді. Бұл жанасатын материалдар бір-біріне бейімделген кезде, беттердің адаптация процесін көрсетеді. Осы кезеңде шар мен диск арасында тұрақты байланыс орнатылады, беттердегі бұзылулар, микробөлшектер және мүмкін оксидті қабаттар жойылады. Үйкеліс коэффициентінің жоғарылауы тегіс және біркелкі, айтарлықтай ауытқуларсыз, бұл бастапқы кезеңде жабынның немесе материалдың жеткілікті біртектілігін көрсетеді. Бұл сипаттамалар үлгі материалдың ақаусыз немесе қарқынды тозусыз бастапқы жүктемеге төтеп бере алатынын көрсетеді. Бұл фаза контакт аймағындағы қысым барынша шоғырланған кезде материалдың алғашқы үйкеліс циклына қалай әрекет ететінін бағалау үшін маңызды. 15 метрден 20 метрге дейін үйкеліс коэффициенті тұрақтанып, үйкеліс жолы соңына дейін салыстырмалы түрде қалыпты 0,9 үйкеліс коэффициентін көрсетеді. Сонымен қатар, кескінде СЭМ BSE режимінде алынған материалдың көлденең қимасы көрсетілген, онда үш аймақ айқын байқалады: сол жақта – тығыз әрі біртекті түпнұсқа, ортасында – құрылымы кеуекті және әркелкі өтпелі қабат (жабын мен түпнұсқа арасындағы интерфейс), ал оң жақта – тығыздығы төмен, қара түсті қаптама қабаты. Бұл морфология термиялық бүрку арқылы алынған көп-қабатты жабындарға тән құрылымды көрсетеді (2-сурет).

Үйкеліс коэффициенті $\sim 0,2$ -ден $\sim 0,7006$ -ге дейін біркелкі өседі. Бұл ZrCN жабынының үстіңгі қабатының бірте-бірте тозғанын көрсетеді. Бұл кезеңде бет жүктемелерге бейімделеді, сонымен қатар қолдану процесінде сөзсіз пайда болатын жабынның тозу өнімдері (ұсақ бөлшектер) жойылуы мүмкін жанасу аймағында қалыптасады, бұл үйкелістің тегіс артуына да әсер етеді. Беткейлердің «ұнтақталуы» (притирка) деп аталатын нәрсе орын алады - жабынның қарсы корпустың пішініне бейімделуі. ZrCN жабыны түпнұсқаны қарсы корпустен тікелей жанасудан тиімді қорғайды, болат тозуының қарқындылығын төмендетеді. Бұл кезеңде жабын белсенді абразивті режимде жұмыс істейді, оның негізгі міндеті - түпнұсқаны қорғау. Қаптаманың тозуы аяқталғаннан кейін үйкеліс коэффициенті $\sim 0,75$ деңгейінде тұрақтанады. Тербеліс минималды, бұл жүйенің біркелкі жұмысын көрсетеді. Фазаның ортасында жабын толығымен тозып, түпнұсқа, 65Г болат байланысқа түсті. Бұл кезеңде жұмыс негізінен түпнұсқаның механикалық сипаттамаларына байланысты орын алады. ZrCN қорғаныш қасиеттерінің арқасында жабыннан түпнұсқаға өту тегіс, бұл үйкелісте кенеттен секірулерді болдырмайды. Соңғы фазада (20–30 м) үйкеліс коэффициенті минималды ауытқулармен $\sim 0,7777$ – $0,8328$ тұрақты болып қалады. Бұл түпнұсқаның тұтастығының сақталғанын көрсетеді. Бұл кезеңде түпнұсқа жұмысты толығымен қабылдайды. Бақыланатын шамалы ауытқулар болат тозу өнімдерінің пайда болуымен немесе бетінің микроқұрылымындағы шамалы өзгерістермен байланысты болуы мүмкін, үйкеліс коэффициентінің күрт жоғарылауы негіздің тозуға төзімділігі мен механикалық тұрақтылығын көрсетеді. Қаптау, бұл фазада болмаса да, өзінің негізгі міндетін орындады - түпнұсқаның бастапқы тозуын азайту, бұл оның тұрақты мінез-құлқын көрсетуге мүмкіндік береді. Жабын мен түпнұсқа жүйесі ұзақ мерзімді тұрақтылықты көрсетеді, бұл ZrCN 65Г болат негізімен біріктірудің тиімділігін растайды. 3-үлгінің СЭМ арқылы алынған кескінде жабынның екі аймағы көрсетілген: сол жақтағы құрылым кеуекті, фазалық әркелкілігі жоғары және дәндер арасы айқын байқалады, бұл өтпелі қабатқа тән, ал оң жақтағы аймақ біртекті, бетінде механикалық өңдеу іздері мен ақшыл қатты бөлшектер бар, бұл жабынның беткі қабатының тығыз өрі тұрақты екенін көрсетеді.

Зерттеу нәтижелерін талдай келе, салыстырмалы түрде үш үлгінің де ZrCN жабындары үйкеліс процесінің бастапқы кезеңінде тиімді қорғаныш қабат ретінде қызмет атқарғаны байқалады. 2-суретте бейнеленген 1-үлгіде үйкеліс коэффициентінің ең жоғары мәні ($\sim 0,9$) тіркеліп, жабынның жоғары адгезиялық қасиеттерін және тығыз морфологиясын көрсетті. 3-суретте көрініс тапқан 2-үлгіде үйкеліс коэффициенті бірқалыпты және біртіндеп өсуімен ерекшеленіп, жабын мен субстрат арасындағы жақсы үйлесімділікті және тиімді адаптация процесін дәлелдейді. Ал 4-суреттегі 3-үлгіде жабын тозғаннан кейін де жүйе біркелкі жұмыс істеп, үйкеліс коэффициентінің салыстырмалы тұрақтылығын сақтады, бұл түпнұсқа 65Г болаттың жоғары механикалық төзімділігін көрсетеді. Жалпы, барлық үлгілерде ZrCN жабындарының тозуға қарсы тиімділігі мен түпнұсқаны бастапқы жүктемеден қорғау қабілеті жоғары деңгейде екені анықталды.



4-сурет - Бұрку параметрі: газ – 1,7 бар, ауа қысымы – 3,8 бар, оттегі – 2,8 бар-ға ие 1-үлгінің үйкеліс коэффициенті және үйкеліс жолының СЭМ кескіні

Қорытынды. Қорытындылай келе, жүргізілген зерттеу нәтижелері ZrCN негізіндегі жабындардың 65Г болаты үшін тиімді қорғаныш қабат бола алатынын көрсетті. Виккерс әдісі бойынша микроқаттылық таралуына сүйене отырып, жабындардың қаттылығы бастапқы болатқа қарағанда шамамен 3,5 есе жоғары екендігі анықталды, бұл олардың жоғары механикалық беріктігі мен тозуға төзімділігін дәлелдейді. СЭМ әдісі арқылы алынған үйкеліс коэффициенті мен үйкеліс жолының кескініне сәйкес, жабын мен түпнұсқа арасындағы интерфейстің құрылымдық ерекшеліктерін ашып көрсетіп, жабынның тығыздығы, біртектілігі - үлгілердің жақсы сапада орындалғанын растады. Үйкеліс коэффициентінің өзгеру динамикасы әр үлгіде жабын мен түпнұсқа арасындағы өзара әрекеттесу ерекшеліктерін көрсетті. Бұрку параметрі газ – 1,7 бар, ауа қысымы – 2,4бар, оттегі – 2,8 бар-ға ие 1-үлгі - үйкеліс коэффициентінің жоғары мәндерін көрсете отырып, жабынның трибологиялық жүктемелерге төзімділігін растады. Сондай-ақ, бұрку параметрі: газ – 1,7 бар, ауа қысымы – 2,8 бар, оттегі – 2,8 бар-ға ие 2-үлгіде тиімді үйкеліс тұрақтылығымен және салыстырмалы төмен кедергімен ерекшеленіп, практикалық қолдану үшін оңтайлы нұсқа болып табылады. Ал, бұрку параметрі: газ – 1,7 бар, ауа қысымы – 3,8 бар, оттегі – 2,8 бар болған 3-үлгі үшін үйкеліс коэффициентінің ең төменгі мәндеріне ие болғанымен, бұл оның тозуға төзімділігі төмендеу болуы мүмкін екенін көрсетеді. Жалпы алғанда, ЖЖООБ технологиясымен алынған ZrCN жабындары 65Г болаттың қызмет ету мерзімін ұзартуға, тозуға төзімділігін арттыруға және трибологиялық сипаттамаларын жақсартуға елеулі үлес қоса алатынын көрсетті. Бұл нәтижелер болашақта жабындарды өндіру мен қолдану параметрлерін оңтайландыруда пайдалы болмақ.

Зерттеулерді қаржыландыру көзі - зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және Жоғары Білім Министрлігінің Ғылым Комитетінің қолдауымен «AP22787358 - Мақта тазалау машиналарының ара дискілері үшін наноқұрылымдық қорғаныш жабынды алу-дың тиімді технологияларын әзірлеу» жобасы аясында жүргізілді.

Әдебиеттер/References

- 1 Wang X., & Li J. (2023). Experimental investigation of 65Mn processed by equal channel angular pressing. Results in Engineering, 18. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101222>
- 2 Wang Y., Li D., Nie C., Gong P., Yang J., Hu Z. & Ma M. (2023). Research progress on the wear resistance of key components in agricultural machinery. *Materials*, 16(24), 7646.
- 3 Ndumia J. N., Kang M., Gbenontin B. V., Lin J., Liu J., Li H. & Nyambura S. M. (2023). Optimizing Parameters of Arc-Sprayed Fe-Based Coatings Using the Response Surface Methodology. *Journal of Thermal Spray Technology*, 32(7), 2202–2220. <https://doi.org/10.1007/s11666-023-01621-2>
- 4 Ndumia J. N., Kang M., Gbenontin B. V., Lin J., Liu J. & Nyambura S. M. (2023). Evaluation of thermal shock failure mechanism of arc-sprayed Fe-based coatings deposited on different substrates. *Surface and Coatings Technology*, 474, 130081.
- 5 Huang K., Wu K., Li S., Zhang Z., Li M., Wang L., Yi X. (2023). Microstructure and properties evaluation of vacuum and laser cladding Ni-base composite coatings. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, 129(2). <https://doi.org/10.1007/s00339-023-06411-9>
- 6 Fang Y. & Chen X. (2023). Effect of Nano-La₂O₃ and Mo on Wear Resistance of Ni60a/SiC Coatings by Laser Cladding. *Processes*, 11(3). <https://doi.org/10.3390/pr11030850>
- 7 Padamata S. K., Yasinskiy A., Yanov V. & Saevarsdottir G. (2022, February 1). Magnetron Sputtering High-Entropy Alloy Coatings: A Mini-Review. *Metals*. MDPI. <https://doi.org/10.3390/met12020319>
- 8 Musil J. & Vlček J. (2001). Magnetron sputtering of hard nanocomposite coatings and their properties. *Surface and Coatings Technology*, 142–144, 557–566. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(01\)01139-2](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(01)01139-2)
- 9 Рахадиллов Б.К., Муктанова Н., Журерова Л.Г. Применение технологии hvof для получения износостойких покрытий на основе wc – обзор. Вестник НЯЦ РК. 2023;(1):4–14. <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2023-1-4-14>. [Rakhadilov B.K., Muktanova N., Zhurerova L.G. Primenenie tekhnologii hvof dlya polucheniya iznosostoykikh pokrytiy na osnove wc – obzor. Vestnik NYaTs RK. 2023;(1):4–14. <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2023-1-4-14>]
- 10 Nie H., Li Z., Zhou H., Wu J., Wen G. & Li Y. (2024). Study on the wear resistance and mechanism of HVOF-sprayed WC10Co4Cr coatings. *Surface and Coatings Technology*, 494, 131368.
- 11 Guzanová A., Brezinová J., Draganovská D. & Maruschak P. O. (2019). Properties of coatings created by HVOF technology using micro- and nano-sized powder. *Koroze a Ochrana Materialu*, 63(2), 86–93. <https://doi.org/10.2478/kom-2019-0011>
- 12 Berger L. M. (2015). Application of hardmetals as thermal spray coatings. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 49(1), 350–364. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2014.09.029>
- 13 He J. & Schoenung J. M. (2002, October 25). Nanostructured coatings. *Materials Science and Engineering: A*. Elsevier BV. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(01\)01986-4](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(01)01986-4)
- 14 Silva E., de Figueiredo M. R., Franz R., Galindo R. E., Palacio C., Espinosa A., & Carvalho, S. (2010). Structure–property relations in ZrCN coatings for tribological applications. *Surface and Coatings Technology*, 205(7), 2134–2141.
- 15 Braic M., Braic V., Balaceanu M., Zoita C. N., Kiss A., Vladescu, A. & Ripeanu, R. (2011). Structure and properties of Zr/ZrCN coatings deposited by cathodic arc method. *Materials Chemistry and Physics*, 126(3), 818–825.
- 16 Kudapa S., Narasimhan K., Boppana P. & Russell W. C. (1999). Characterization and properties of MTCVD TiCN and MTCVD ZrCN coatings. *Surface and Coatings Technology*,

120, 259-264.

17 Frank F., Tkadletz M., Czettl C., & Schalk N. (2021). Microstructure and Mechanical Properties of ZrN, ZrCN and ZrC Coatings Grown by Chemical Vapor Deposition. *Coatings*, 11(5), 491. <https://doi.org/10.3390/coatings11050491>

18 Акула И. П., Чекан Н. М., Хома М. Ю., & Онысько С. Р. (2024). Композиционное покрытие AlCr (C) N/Zr (C) N. Перспективные направления инновационного развития и подготовки кадров, 2(Часть 1), 6-16. [Akula, I. P., Chekan, N. M., Khoma, M. Yu., & Onysko, S. R. (2024). Kompozitsionnoe pokrytie AlCr(C)N/Zr(C)N. Perspektivnye napravleniya innovatsionnogo razvitiya i podgotovki kadrov, 2(Chast' 1), 6–16.]

19 Ul-Hamid A. Deposition, microstructure and nanoindentation of multilayer Zr nitride and carbonitride nanostructured coatings. *Sci Rep* 12, 5591 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-09449-6>

20 Lu Y., Peng Y. & Shi, Z. (2024). Plasma nitrided 65Mn steel: microstructure, tribocorrosion and electrochemical properties and DFT calculation. *Wear*, 544, 205319.

21 Kurbanbekov S., Rakhadilov B., Kakimzhanov D., Seitov B., Katpaeva K., Kurmantayev A. & Kengesbekov A. (2024). Research on the Structural–Phase and Physical–Mechanical Characteristics of the Cr3C2–NiCr Composite Coating Deposited by the HVOF Method on E110 Zirconium Alloy. *Coatings*, 14(8), 1030.

22 Goldstein J. I. et al. Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis. – springer, 2017.

23 Echlin P., Fiori C. E., Goldstein J., Joy D. C. & Newbury D. E. (2013). *Advanced scanning electron microscopy and X-ray microanalysis*. Springer Science & Business Media.

Coating Deposited by the HVOF Method on E110 Zirconium Alloy. *Coatings*, 14(8), 1030.

Мусахан Н.П.¹, Курбанбеков Ш.Р.¹, Балтабаева Д.Э.¹, Камбарбеков С.Х.¹

¹Международный казахско-турецкий университет имени Х.А. Ясави, г.Туркестан, Казахстан

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКОЙ И МОРФОЛОГИЧЕСКОЙ СТАБИЛЬНОСТИ ПОКРЫТИЙ ZRCN ДЛЯ СТАЛИ 65Г

Аннотация. В данной статье представлены результаты исследования физико-механической и морфологической устойчивости покрытий на основе ZrCN, нанесённых на сталь 65Г. Результаты исследования показывают, что керамические покрытия на основе ZrCN обладают высокой термической стабильностью и устойчивостью к физико-химическим воздействиям, что делает их эффективным защитным покрытием для металлических деталей и режущих инструментов, работающих в экстремальных условиях. Целью исследования является изучение структурно-фазовых и трибологических свойств покрытий ZrCN, полученных методом высокоскоростного кислородно-топливного напыления (ВСКТН), с целью повышения износостойкости деталей из стали 65Г, применяемых в пыльных дисках хлопкоочистительных машин. На сталь 65Г были нанесены покрытия ZrCN в трёх различных режимах, после чего были определены их микротвёрдость и коэффициент трения. В результате среднее значение микротвёрдости трёх образцов с нанесённым покрытием составило 1661,7 HV, что примерно в 3,5 раза выше по сравнению с исходной сталью. С помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) была охарактеризована морфология, плотность покрытия и структура переходного слоя, при этом подтверждена низкая пористость. Испытания на износ по схеме «шар–диск» показали высокую износо-

стойкость покрытия и его способность эффективно защищать основной материал. Данное исследование доказывает, что покрытия ZrCN, полученные методом HVOF, представляют собой перспективное решение для увеличения срока службы деталей, используемых в сельскохозяйственной технике.

Ключевые слова: микротвёрдость, ВСКТН, коэффициент трения, трибология, покрытия ZrCN, сканирующая электронная микроскопия.

* * *

Mussakhan N.P.¹, Kurbanbekov Sh.R.¹, Baltabayeva D.E.¹, Kambarbekov S.Kh.¹

¹Akhmet Yassawi University, Turkistan c., Kazakhstan

INVESTIGATION OF THE PHYSICO-MECHANICAL AND MORPHOLOGICAL STABILITY OF ZrCN COATINGS FOR 65G STEEL

Abstract. This article presents the results of a study on the physicomachanical and morphological stability of ZrCN-based coatings applied to 65G steel. The findings demonstrated that ceramic coatings based on ZrCN possess high thermal stability and resistance to physicochemical effects, making them an effective protective coating for metal parts and cutting tools operating under extreme conditions. The aim of the study was to investigate the structural-phase and tribological properties of ZrCN coatings obtained by High-Velocity Oxygen Fuel (HVOF) spraying in order to improve the wear resistance of 65G steel components used in the saw blades of cotton ginning machines. ZrCN coatings were applied to 65G steel in three different spraying modes, and their microhardness and coefficient of friction were determined. As a result, the average microhardness of the three coated samples was 1661.7 HV, which is approximately 3.5 times higher than that of the base steel. Scanning Electron Microscopy (SEM) was used to characterize the morphology, density, and structure of the transition layer of the coating, confirming low porosity. Friction tests conducted using the “ball–disk” scheme showed the high wear resistance of the coating and its ability to effectively protect the substrate. This study demonstrates that ZrCN coatings obtained by the HVOF method represent a promising solution for extending the service life of components used in agricultural machinery.

Keywords: microhardness, HVOF, coefficient of friction, tribology, ZrCN coating, scanning electron microscopy.

Авторлар туралы мәліметтер

Мұсахан Нүркен Парсаханұлы – магистр, Қ.А. Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті, Жаратылыстану ғылымдары, нанотехнологиялар және жаңа материалдар ғылыми-зерттеу институтының ғылыми қызметкері, Түркістан қ., Қазақстан, nurken.mussakhan@ayu.edu.kz

Курбанбеков Шерзод Рустамбекович – PhD, қауымдастырылған профессор, Қ.А. Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті, Жаратылыстану ғылымдары, нанотехнологиялар және жаңа материалдар ғылыми-зерттеу институтының директоры, Түркістан қ., Қазақстан, sherzod.kurbanbekov@ayu.edu.kz

Балтабаева Дилноза Эрмахаммадқызы – магистр, Қ.А. Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті, Жаратылыстану ғылымдары, нанотехнологиялар және

жаңа материалдар ғылыми-зерттеу институтының ғылыми қызметкері, Түркістан қ., Қазақстан, dilnoza.baltabayeva@ayu.edu.kz

Камбарбеков Сардор Хуснутдинұлы – магистр, Қ.А. Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті, Жаратылыстану ғылымдары, нанотехнологиялар және жаңа материалдар ғылыми-зерттеу институтының кіші ғылыми қызметкері, Түркістан қ., Қазақстан, sardor.kambarbekov@ayu.edu.kz

Сведения об авторах

Мусахан Нуркен Парсаханұлы – магистр, научный сотрудник научно-исследовательского института «Естественные науки, нанотехнологии и новые материалы», Международный казахско-турецкий университет имени Х.А.Ясави, г.Туркестан, Казахстан, nurken.mussakhan@ayu.edu.kz

Курбанбеков Шерзод Рустамбекович – PhD, ассоциированный профессор, директор научно-исследовательского института «Естественные науки, нанотехнологии и новые материалы», Международный казахско-турецкий университет имени Х.А.Ясави, г. Туркестан, Казахстан, sherzod.kurbanbekov@ayu.edu.kz

Балтабаева Дилноза Эрмахаммадқызы – магистр, научный сотрудник научно-исследовательского института «Естественные науки, нанотехнологии и новые материалы», Международный казахско-турецкий университет имени Х.А.Ясави, г. Туркестан, Казахстан, dilnoza.baltabayeva@ayu.edu.kz

Камбарбеков Сардор Хуснутдинұлы – магистр, младший научный сотрудник научно-исследовательского института «Естественные науки, нанотехнологии и новые материалы», Международный казахско-турецкий университет имени Х.А.Ясави, г. Туркестан, Казахстан, sardor.kambarbekov@ayu.edu.kz

Information about the authors

Mussakhan Nurken Parssakhanuly – master, researcher at the Scientific Research Institute «Natural Sciences, nanotechnologies and new materials», Akhmet Yassawi University, Turkestan c., Kazakhstan, nurken.mussakhan@ayu.edu.kz

Kurbanbekov Sherzod Rustambekovich – PhD, Associate Professor, Head of the Scientific Research Institute «Natural Sciences, nanotechnologies and new materials», Akhmet Yassawi University, Turkestan c., Kazakhstan, sherzod.kurbanbekov@ayu.edu.kz

Baltabayeva Dilnoza Ermakhammadkyzy – master, researcher at the Scientific Research Institute «Natural Sciences, nanotechnologies and new materials», Akhmet Yassawi University, Turkestan c., Kazakhstan, dilnoza.baltabayeva@ayu.edu.kz

Kambarbekov Sardor Khusnutdinuly – master, Junior Researcher at the Scientific Research Institute «Natural Sciences, nanotechnologies and new materials», Akhmet Yassawi University, Turkestan c., Kazakhstan, sardor.kambarbekov@ayu.edu.kz