

Балтабаева Д. Э.¹, Қалдар Б.С.², Абдурахманова Ш. Ш.³, Амангельдиева Ю.О.⁴, Эртаев Н.С.⁵

¹магистр, Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті,
(Қазақстан, Түркістан қ.), e-mail: dilnoza.baltabayeva@ayu.edu.kz

²студент, Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті,
(Қазақстан, Түркістан қ.), e-mail: Berik2002Berik@gmail.com

³магистр, Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті,
(Қазақстан, Түркістан қ.), e-mail: shakhnoza.abdurakhmanova@ayu.edu.kz

⁴магистрант, Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті,
(Қазақстан, Түркістан қ.), e-mail: yulduz.amangeldieva12345@mail.ru

⁵магистрант, Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті,
(Қазақстан, Түркістан қ.), e-mail: nurs.ertaev@gmail.com

**ЖОҒАРЫ ЖЫЛДАМДЫҚТЫ ЖАЛЫНМЕН БҮРКУ ӘДІСІ АРҚЫЛЫ АЛЫНҒАН ZRCN
ЖАБЫНЫҢ ФИЗИКА-МЕХАНИКАЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІН ЗЕРТТЕУ
INVESTIGATION OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF ZRCN COATINGS
OBTAINED BY HIGH VELOCITY OXYGEN FUEL METHOD
ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОКРЫТИЙ ZRCN,
ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ГАЗОПЛАМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ**

Аңдатпа. Цирконий карбонитридiне (ZrCN) негiзделген жабындар 65Г және У8Г болаттарының механикалық және пайдалану сипаттамаларын айтарлықтай жақсартады. Бұл жабындар жоғары тозуға төзімділігімен және берiктігімен ерекшеленедi, сондықтан оларды металл өңдеу және машина жасау салаларында кеңiнен қолдануға болады. Зерттеулер көрсеткендей, жоғары жылдамдықты оттегі жалынымен бүрку (HVOF) әдiсi ZrCN жабындарын қалыптастыруда жоғары тиімділік көрсетедi. Бұл әдiс өңделген беттерде тығыз, берiк және жоғары адгезиясы бар жабындарды алуға мүмкiндiк бередi. Микроқаттылық көрсеткiштерi жабын қолданылғаннан кейiн айтарлықтай өсетiнi анықталды. Атап айтқанда, 65Г болатының микроқаттылығы 456,6 HV-ге, ал У8Г болатының қаттылығы 649,7 HV-ге дейiн артқан. Үлгiлердiң үйкелiс пен тозу сынақтары ASTM G99 стандарты бойынша Трибометр TRB3 құрылғысында жүргiзiлдi. Қарсы корпус ретiнде диаметрi 6 мм 100Cr6 корунд шары қолданылды. Сынақтар құрғақ үйкелiс режимiнде орындалды, онда қарсы дене ұстағышына жүктеме 5 Н және үлгiнiң айналу жылдамдығы 2 см/сек болды. Сынақтар ауа атмосферасында, 25,49°C температурада және 21,72% ылғалдылықта өттi. Үйкелiс жолы 30 метрді құрады. ZrCN жабындарының жоғары тиімділігі оның ерекше физикалық және химиялық қасиеттерімен түсiндiрiледi. 65Г және У8Г болаттарында ZrCN жабындарын пайдалану өнiмнiң қызмет ету мерзiмiн ұзартуға, оның сенiмділігі мен өнiмділігiн арттыруға мүмкiндiк бередi. Сонымен қатар, алынған нәтижелер ZrCN жабындарының үйкелiс коэффициентiн төмендетiп, тозуға төзімділікті арттыратынын дәлелдейдi. Бұл зерттеудiң қорытындылары болашақта осындай жабындардың басқа металл қорытпаларында қолданылу мүмкiндiгiн де қарастыруға негiз болады.

Негiзгi сөздер: У8Г және 65Г болаттар, үйкелiс коэффициентi, микроқаттылық, ZrCN жабыны, ЖЖЖБ.

Abstract. Coatings based on zirconium carbonitride (ZrCN) significantly improve the mechanical and operational characteristics of 65G and U8G steels, increasing their wear resistance and durability. The high-speed oxygen-flame spraying (HVOF) method allows obtaining dense, durable and highly adhesive coatings. In particular, the microhardness of 65G steel increased to 456.6 HV, and the hardness of U8G steel increased to 649.7 HV. Friction and wear tests of samples were carried out on a TRB3 tribometer in accordance with the ASTM G99 standard. A 100Cr6 corundum ball with a diameter of 6 mm was used as a counterbody. The tests were carried out in the dry friction mode, while the load on the counterbody holder was 5 N, and the rotation speed of the sample was 2 cm / s. The tests were conducted in an air atmosphere at a temperature of 25.49°C and a humidity of 21.72%. The friction distance was 30 meters. The high efficiency of ZrCN coatings is explained by their unique physical and chemical properties. Their use extends the service life of products, increases reliability and reduces the friction coefficient. These studies confirm the prospects of ZrCN for protecting metal alloys from wear and create a basis for further developments in this area.

Key words: U8G and 65G steels, friction coefficient, microhardness, ZrCN coating, HVOF.

Аннотация. Покрытия на основе карбонитрида циркония (ZrCN) значительно улучшают механические и эксплуатационные характеристики сталей 65Г и У8Г. Данные покрытия характеризуются высокой износостойкостью и долговечностью, поэтому их можно широко применять в металлообрабатывающей и машиностроительной отраслях. Исследования показали, что метод высокоскоростного кислородно-пламенного напыления (HVOF) весьма эффективен при формировании покрытий ZrCN. Данный метод позволяет получать плотные, прочные и высокоадгезионные покрытия на обработанных поверхностях. Установлено, что после нанесения покрытия значения микротвердости значительно возросли. В частности, микротвердость стали 65Г увеличилась до 456,6 HV, а твердость стали У8Г увеличилась до 649,7 HV. Испытания образцов на трение и износ проводились на трибометре TRB3 в соответствии со стандартом ASTM G99. В качестве контртела использовался корундовый шарик 100Cr6 диаметром 6 мм. Испытания проводились в режиме сухого трения, при этом нагрузка на держатель контртела составляла 5 Н, а скорость вращения образца – 2 см/с. Испытания проводились в воздушной атмосфере при температуре 25,49°C и влажности 21,72%. Расстояние трения составило 30 метров. Высокая эффективность покрытий ZrCN объясняется его уникальными физико-химическими свойствами. Применение покрытий ZrCN на сталях 65Г и У8Г позволяет продлить срок службы изделия, повысить его надежность и производительность. Кроме того, полученные результаты доказывают, что покрытия ZrCN снижают коэффициент трения и повышают износостойкость. Результаты данного исследования также дадут основу для рассмотрения возможности использования подобных покрытий на других металлических сплавах в будущем.

Ключевые слова: стали У8Г и 65Г, коэффициент трения, микротвердость, покрытие ZrCN, HVOF.

Кіріспе

Қазіргі заманғы материалтану және нанотехнологиялар саласындағы үрдістер беттерді өндеудің жаңа әдістерін әзірлеуге және материалдардың қасиеттерін жақсартуға әкелді. Жабындарды алу үшін әртүрлі әдістер қолданылады, олардың ішінде физикалық және химиялық әдістер кең таралған. Физикалық әдістерге ЖЖЖБ, вакуумдық буландыру (PVD), плазмалық бүрку және магнетрондық тозаңдату жатады, олар жоғары адгезиялы, тығыз жабындар қалыптастыруға мүмкіндік береді [1,2]. Магнетрондық тозаңдату әсіресе жұқа, біркелкі және жоғары сапалы жабындар алу үшін қолданылады [3]. Химиялық әдістерден химиялық бу тұндыру (CVD) және электрохимиялық тұндыру (электролиз) кеңінен пайдаланылады, олар күрделі пішінді бөлшектерге біркелкі қабат қалыптастыруға тиімді [4]. Сонымен қатар, сол-гель (sol-gel) және лазерлік жабу технологиялары да жоғары тозуға төзімді, коррозияға қарсы жабындар алуда қолданылады [5].

Қазіргі таңда перспективалы бағыттардың бірі ЖЖЖБ–жоғары жылдамдықты газды жалынмен бүрку технологиясы, ол наноқұрылымды жабындарды алуға мүмкіндік береді [6-9]. ЖЖЖБ–материалдардың жоғары тозуға төзімділігін, коррозияға беріктігін және жылу тұрақтылығын қамтамасыз ететін қорғаныш жабындарды алудың негізгі әдістерінің бірі. Мұндай жабындарды жасау үшін қолданылатын материалдар арасында ZrCN өзінің жоғары қаттылығы және агрессивті ортаға төзімділігімен ерекшеленеді [10-12].

ZrCN–жоғары қаттылық, тотығуға төзімділік және жылу тұрақтылығы сияқты ерекше қасиеттерге ие материал. Хие және әріптестерінің зерттеулері ЖЖЖБ әдісімен алынған ZrCN жабындарының дәстүрлі әдістермен алынған жабындарға қарағанда жетілдірілген механикалық қасиеттерге ие екенін көрсетті. Бұл жабындар аэрокосмостық және автомобиль өнеркәсібінде, экстремалды пайдалану жағдайларына төтеп бере алатын материалдар қажет салаларда кеңінен қолданылады [13].

Зерттеулер ЖЖЖБ арқылы алынған наноқұрылымды ZrCN жабындарының тығыздығы мен біртектілігі жоғары екенін және олардың қорғаныс қасиеттерінің айтарлықтай жақсарғанын көрсетеді. Мысалы, Zhang және әріптестері микроструктураны бақылау арқылы жабынның жарықшақтар мен ақаулар түзілуін азайтуға болатынын атап өтті, бұл оның ұзақ мерзімділігі үшін аса маңызды [14-16].

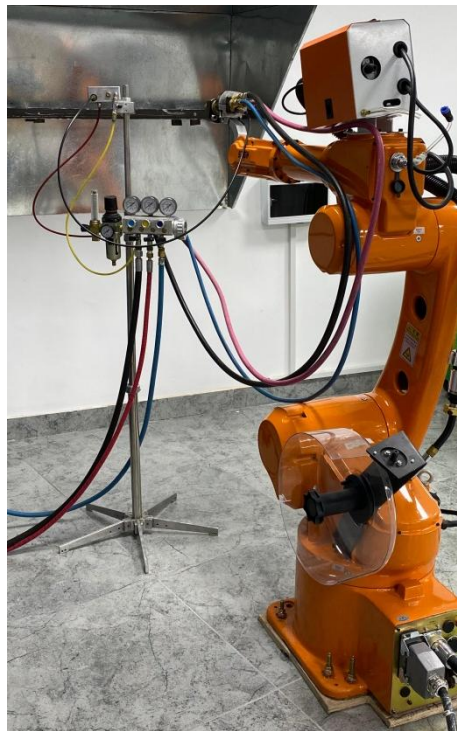
Бүрку параметрлерін онтайландыру жабын сапасын қамтамасыз етуде маңызды рөл атқарады. Singh және әріптестерінің зерттеулері жалын температурасы мен газ қысымының фазалық құрамға және микроструктураға айтарлықтай әсер ететінін көрсетті. Мысалы, температураны арттыру жабын тығыздығының жоғарылауына ықпал етеді,

бірақтүйіршіктердің өсу қаупін арттырады, бұл материалдың қаттылығына теріс әсер етуі мүмкін [17,18].

Жоғарыда көрсетілген зерттеу нәтижелерін ескере отырып осы зерттеуде жоғары жылдамдықты газды жалынмен бүрку әдісі арқылы алынған ZrCN физика-механикалық қасиеттерін зерттеу осы жұмыстың негізгі мақсаты болып табылады.

Зерттеу әдістері

ЖЖЖБ арқылы жабындарды қалыптастыру үшін арнайы жабдықталған құрылғы қолданылады (сурет 1). Оның негізгі бөлігі–газ жалын ағынымен әрекеттесетін оттықтар. Жалын жанғыш қоспаның жануы арқылы пайда болып, оттық саптамасынан жоғары жылдамдықпен шығады. Қазіргі газ-жалын бүріккіштерінде материал сым, иілгіш бау, штанга немесе ұнтақ түрінде беріледі. Жанғыш қоспаны қыздыру аймағына беру үшін арналар концентрлі жасалған. Жанған қоспа сақиналы жалын түзіп, материалды жоғары пластикалық немесе сұйық күйге дейін қыздырады. Нәтижесінде балқытылған бөлшектер бетке бүркіліп, жабын қабатын құрайды [19].



Сурет 1. ЖЖЖБ жоғары жылдамдықты бүрку қондырғысы: оттық, ұнтақ диспенсері, чиллер, газды басқару панелі, компрессор, баллондағы газ (C_3H_8), баллондағы газ (O_2) бөліктерінен тұрады.

Бүрку қашықтығы–термиялық бүріккіш жабынның маңызды параметрлерінің бірі, ол материал бөлшектерінің температурасы мен жылдамдығына әсер етеді. ЖЖЖБ технологиясында жалын температурасы $3200^{\circ}C$ -қа, ал ағын жылдамдығы гипердыбыстық деңгейге дейін жетуі мүмкін. Материал бөлшектері $80\text{--}1000$ м/с жылдамдыққа дейін қызады, бұл аппарат құрылымына және газ қоспасының құрамына байланысты өзгереді [20,21].

Заманауи газ-жалын бүріккіштерде материал саптама арқылы беріледі және сақиналы жалынның әсерінен пластикалық немесе сұйық күйге дейін қызады. Сым және өзек материалдар қолданылғанда, балқытылған зат сығылған ауамен ұсақ бөлшектерге бөлініп, бетке жоғары жылдамдықпен шөгеді. Дегенмен, бұл әдісте жылу энергиясының жоғалуы

мүмкін. Бүркуге арналған материалдың жанбай, балқу және қайнау температуралары арасында жеткілікті айырмашылыққа ие болуы маңызды [22-24].

Тұрақты сапалы жабын алу үшін нақты уақыт режимінде процестегі параметрлерді бақылау және реттеу қажет. Бұл жабын бөлшектерінің температурасы мен жылдамдығын тұрақты ұстап тұруға арналған ЖЖЖБ бүріккіштерінің басқару жүйелерін әзірлеуге ынталандырады. Мұндай жүйелер нақты уақыттағы диагностикалық әдістер мен газ-бөлшектер жылдамдығын өлшеу технологияларын қолдануды қамтиды. ZrCN негізіндегі жабындарды жоғары жылдамдықты жалын бүрку әдісімен қолдану–әртүрлі өнімдердің өнімділік сипаттамаларын жақсартатын перспективті технология [25].

Микроқаттылық мәндері ГОСТ 9450-76 стандартына сәйкес Виккерс әдісі арқылы Микротвердомер HLV-1DT құрылғысында зерттелді. Зерттеу барысында индентор ретінде 136° бұрыштары бар алмазды төртқырлы пирамида қолданылды. Өлшеу процесінде HV_{0.5} жүктемесі үлгі бетіне түсіріліп, индентор 10 секунд бойы ұсталып тұрды. Кейіннен енгізу іздерінің диагональдық өлшемдері (d₁ және d₂) дәлдікпен анықталды [26].

Үлгілердің үйкеліс пен тозу сынақтары ASTM G99 стандарты бойынша Трибометр TRB3 құрылғысында зерттелді. Қарсы корпус ретінде диаметрі 6 мм 100Cr6 корунд шары қолданылды. Сынақтар құрғақ үйкеліс режимінде қарсы дене ұстағышына жүктеме 5 Н және үлгінің айналу жылдамдығы 2 см/сек болған кезде жүргізілді. Сынақ ауа атмосферасында 25,49°C температурада және 21,72% ылғалдылықта жүргізілді. Үйкеліс жолы 30 метрді құрады.

Зерттеу нәтижелері

Зерттеу барысында 65Г және У8Г маркалы болаттан жасалған үлгілер зерттелді, ал қаптау үшін ZrCN ұнтағы таңдалды. ZrCN–жоғары абразивті тозуға және коррозияға төзімділігімен ерекшеленетін композициялық материал, бұл оның жұмыс барысында тиімділігін арттырады. 65Г және У8Г маркалы болаттан жасалған үлгілер болып табылады. Қаптау үшін таңдалған ұнтақ ZrCN болды. ZrCN–бірегей физика-химиялық қасиеттері бар композициялық материал. Осылайша, ZrCN негізіндегі жабын абразивті тозуға және коррозиялық процестерге төзімділік сияқты бірқатар артықшылықтарға ие.

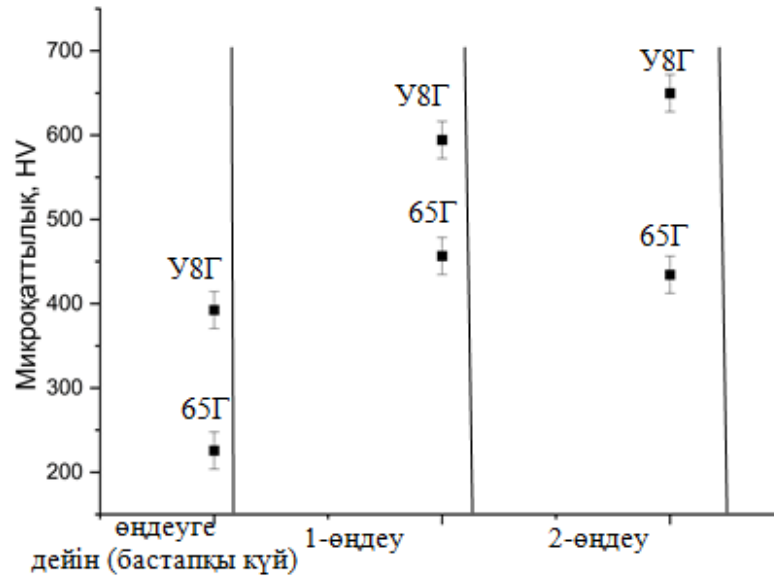
Жобаның міндеттерінде келтірілгендей жабынның өнімділік сипаттамаларына әсерін зерттеу үшін 65Г және У8Г маркалы болат таңдалды. 65Г және У8Г үлгілеріне ZrCN негізіндегі жабынды пайдаланып, кейінгі ЖЖЖБ жабыны үшін дайындалды. Кесте 1-де берілген параметрлер бойынша 65Г және У8Г үлгілеріне ZrCN негізінде жабын алынды.

Кесте 1. 65Г және У8Г үлгісіне жабынды жасау үшін қолданылатын параметрлер

№	Арақашықтық	Отын	Ауа қысымы	Оттегі газы	Ұнтақ
Үлгі1 (65Г)	35-40см	1,7 bar	3 bar	2,8 bar	ZrCN
Үлгі2 (65Г)			3,8 bar		
Үлгі1 (У8Г)			3 bar		
Үлгі2 (У8Г)			3,8 bar		

ZrCN жабыны 65Г және У8Г болаттары үшін тиімді. Төменде көрсетілген мәліметтерге сүйенсек, қаптамаға дейін болаттың микроқаттылығы келесі мәндерге ие: болат У8Г бұл мәндер көміртегінің көп болуына байланысты жоғары болуы мүмкін, бұл жоғары қаттылықты қамтамасыз етеді. Бастапқы күйдегі болаттардың микроқаттылық көрсеткіштері

У8Г 392,65 HV-қа және 65Г 225,75 HV-қа мәндеріне ие. Мәндер төмен көміртекті болаттарға тән орташа қаттылық материалын көрсетеді.



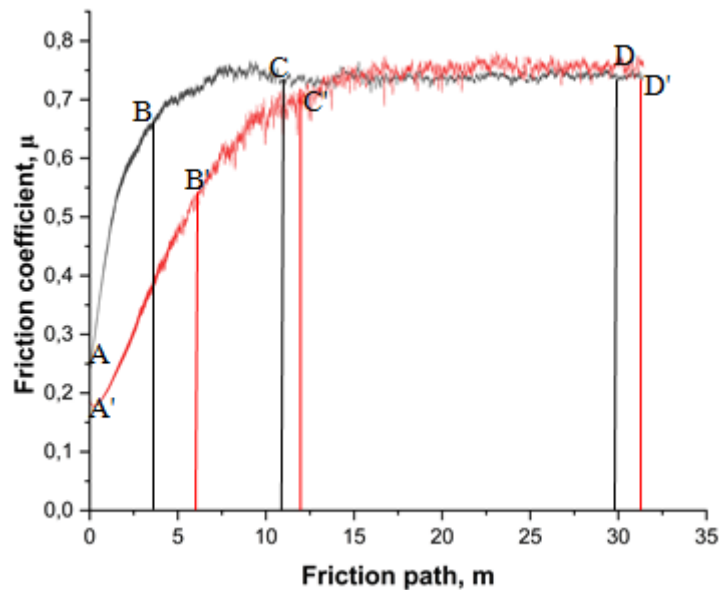
Сурет 2. 65Г және У8Г болаттарының микроқаттылығының мәндері. ЖЖЖБ режимдері: арақашықтық 35-40 см, отын 1,7 bar, ауа қысымы 3 bar, оттегі газы 3 bar қысымдарында 65Г және У8Г (1-өңдеу) және де арақашықтық 35-40 см, отын 1,7 bar, ауа қысымы 3 bar, оттегі газы 3,8 bar қысымдарында 65Г және У8Г (2- өңдеу).

Бұл диаграмма 65Г және У8Г болаттарының (1-өңдеу) бастапқы күйдегі және ZrCN жабыны қолданылғаннан кейінгі микроқаттылығының өзгерісін көрсетеді. ЖЖЖБ процесінде оттегі газы 3 bar қысымында алынған ZrCN жабынының 65Г және У8Г болаттарының (1-өңдеу) микроқаттылығы HLV-1DT микротвердометрінде HV_{0.5} жүктемесімен өлшенді. Индентор үлгі бетіне 10 секунд бойы түсіріліп, әр үлгі 5 рет өлшенді. Нәтижесінде, 65Г болатының ZrCN жабыны үшін микроқаттылығы 456,6 HV, ал У8Г болаты үшін 594,4 HV екендігі анықталды (Сурет 2).

ЖЖЖБ процесінде оттегі газы 3,8 bar қысымында алынған ZrCN жабынының 65Г және У8Г болаттарының (2-өңдеу) микроқаттылығы дәл осы әдіспен өлшенді. Бұл жағдайда 65Г болаты үшін ZrCN жабынының микроқаттылығы 434,4 HV, ал У8Г болаты үшін 649,7 HV мәніне ие болды (Сурет 2).

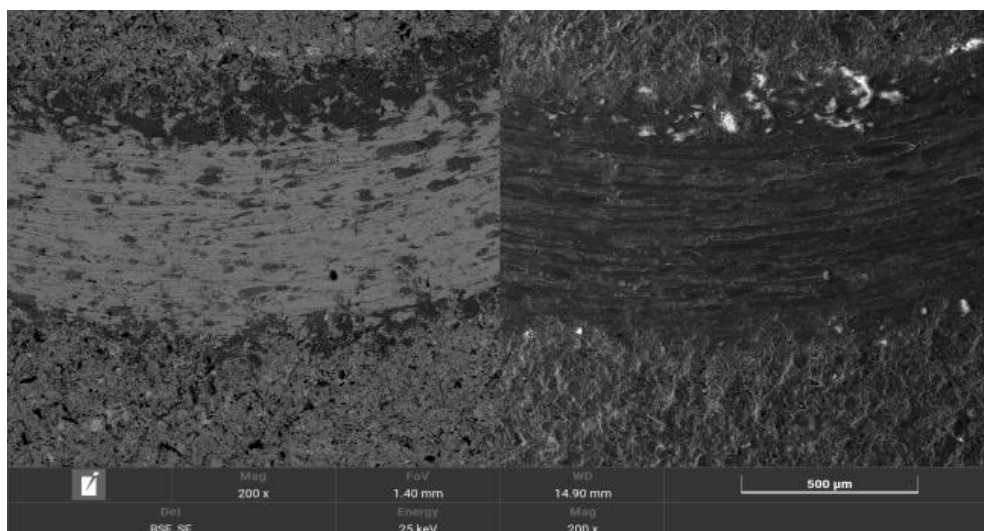
65Г және У8Г болаттарына ZrCN жабын қолданғаннан кейін, У8Г болатының микроқаттылығы жоғары екені анықталды. Бұл оның құрамындағы көміртегі мөлшерінің көптігі мен бастапқы құрылымдық ерекшеліктеріне байланысты, себебі жоғары көміртекті болаттар беріктілігі мен тозуға төзімділігі жоғары материалдар қатарына жатады. ZrCN жабын екі болаттың да микроқаттылығын арттырғанымен, оның тиімділігі материалдың бастапқы қасиеттеріне тәуелді. Сонымен қатар, үйкеліс коэффициенті жабынның тозуға төзімділігін анықтайтын маңызды параметр болып табылады және ол жабын бетінің құрылымы, микроқаттылығы мен морфологиясына байланысты өзгереді [27].

ЖЖЖБ әдісімен алынған ZrCN жабындары, әдетте, жоғары тығыздық пен ұсақ түйіршікті құрылымының арқасында жабысқақ және абразивті тозуды азайтып, төмен үйкеліс коэффициентін көрсетеді [28]. Зерттеулер оның мәні сынақ жағдайлары мен жабын құрамына байланысты 0,2–0,6 диапазонында өзгередінін көрсетті [29]. 65Г болатының ZrCN жабындарының үйкеліс коэффициенттері сурет 3-те көрсетілген.



Сурет 3. 65Г болатындағы ZrCN жабынының үйкеліс коэффициенті

Графикте болат беттеріндегі ZrCN жабыны үшін үйкеліс коэффициентінің (μ) үйкеліс жолына тәуелділігі көрсетілген. 65Г болаты (Үлгі 1) үшін бастапқы фазада, яғни АВ аралығы, (0–3,5 м) $\mu \sim 0,25-0,65$ ге дейін өсіп, беткі қабаттың тозуын көрсетеді. Орта фазада, яғни ВС аралығы (3,5–11,5 м) $\mu \sim 0,7-0,75$ деңгейінде тұрақтанып, жабын толық тозады. Соңғы фазада, яғни CD аралығы (11,5–35 м) $\mu \sim 0,8$ болып қалады, бұл субстраттың жақсы тозуға төзімділігін дәлелдейді. 65Г болаты (Үлгі 2) үшін бастапқы фазада, яғни A'B' аралығы (0–6 м) $\mu \sim 0,5$ -ге дейін өсіп, беткі қабаттың тозуын көрсетеді. Орта фазада, яғни B'C' аралығы, (6–11,5 м) $\mu \sim 0,55-0,7$ деңгейінде тұрақтанып, жабын толық тозады. Соңғы фазада, яғни C'D' аралығы, (11,5–35 м) $\mu \sim 0,75$ болып қалады, бұл субстраттың жақсы тозуға төзімділігін дәлелдейді.

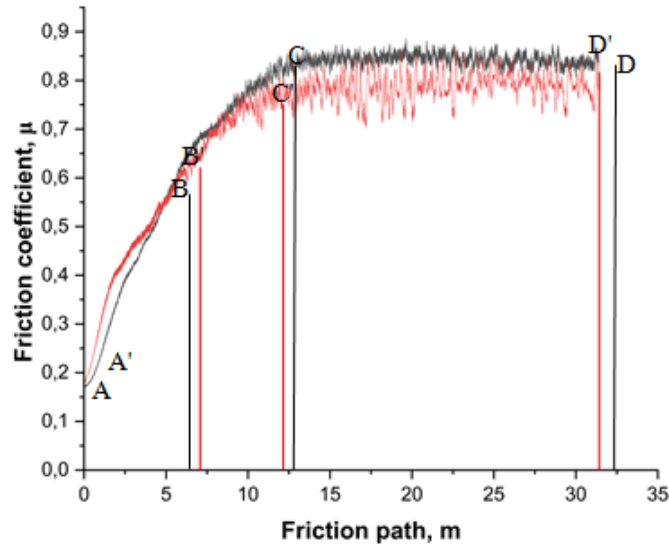


Сурет 4. 65Г болатындағы ZrCN жабынының SEM анализі

SEM анализі 65Г болатындағы ZrCN жабынының көлденең қимасын көрсетеді. BSE/SE режимінде айқын интерфейсі бар көп қабатты құрылым байқалады. Кескіннің сол

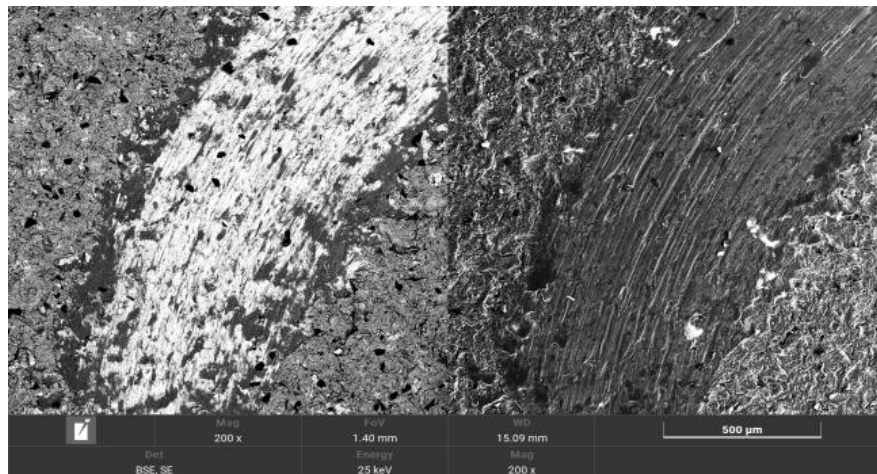
жақ бөлігі ықтимал диффузиялық процестерді көрсететін гетерогенділікпен және химиялық құрамдағы айырмашылықтармен сипатталады. Оң жағында жабынның қабаттық морфологиясы көрсетілген, бұл оның тұндыру және кейінгі жұмыс кезінде қалыптасуын көрсетуі мүмкін. 500 мкм шкала жабынның қалыңдығын, оның негізге адгезиясын және ықтимал өнімділік сипаттамаларын бағалауға мүмкіндік береді.

У8Г болаттарындағы ZrCN жабындарының үйкеліс коэффициенттері сурет 5-те көрсетілген.



Сурет 5. У8Г болатындағы ZrCN жабынының үйкеліс коэффициенті

Графикте болат беттеріндегі ZrCN жабыны үшін үйкеліс коэффициентінің (μ) үйкеліс жолына тәуелділігі көрсетілген. У8Г болаты (Үлгі 1) үшін бастапқы фазада, яғни АВ аралығы (0–5 м) $\mu \sim 0,55$ -ге дейін өсіп, беткі қабаттың тозуын көрсетеді. Орта фазада, яғни ВС аралығы (5–11,5 м) $\mu \sim 0,55$ –0,8 деңгейінде тұрақтанып, жабын толық тозады. Соңғы яғни CD аралығы фазада (11,5–35 м) $\mu \sim 0,85$ болып қалады, бұл субстраттың жақсы тозуға төзімділігін дәлелдейді. У8Г болаты (Үлгі 2) үшін бастапқы фазада, яғни А'В' аралығы, (0–6 м) $\mu \sim 0,55$ -ге дейін өсіп, беткі қабаттың тозуын көрсетеді. Орта фазада, яғни В'С' аралығы, (6–10,5 м) $\mu \sim 0,55$ –0,75 деңгейінде тұрақтанып, жабын толық тозады. Соңғы фазада, яғни С'D' аралығы (10,5–35 м) $\mu \sim 0,75$ болып қалады, бұл субстраттың жақсы тозуға төзімділігін дәлелдейді.



Сурет 6. У8Г болатындағы ZrCN жабынының SEM анализі

SEM анализы У8Г болатындағы ZrCN жабынының көлденең қимасын көрсетеді. BSE/SE режимінде фазалық біртекті емес және кеуектілігі бар гетерогенді құрылым байқалады. Сол жағы химиялық құрамдағы айырмашылықтарды көрсететін ауыспалы контраст аймақтарын көрсетеді, ал оң жағында механикалық кернеу мен тозуды көрсетеді. 500 мкм шкала жабынның қалыңдығын, оның субстратқа адгезиясын және өнімділік сипаттамаларын бағалауға мүмкіндік береді.

Қорытынды

Қорытындай келе, ЖЖЖБ әдісі жоғары адгезиясы бар тығыз жабындар қалыптастырумен танымал, бұл бетінің қасиеттерін жақсартуға ықпал етеді. ZrCN бүрку материалдың қаттылығын және тозуға төзімділігін айтарлықтай арттырады. Зерттеу нәтижелері көрсетілгендей, 65Г болат пен У8Г болаттарының ZrCN жабындары бастапқы фазада үйкеліс коэффициентінің өсуі, бұл жабынның тозуы мен субстратты қорғауын білдіреді. Орта фазада үйкеліс коэффициенті тұрақтанып, жабынның жартылай тозғанын және толық тозудан кейін жүйенің механикалық тұрақтылығын көрсетеді. Соңғы фазада коэффициент тұрақты сақталып, болат субстраттың тозуға төзімділігін дәлелдейді. Бұл ZrCN жабындарының 65Г және У8Г болаттарымен тиімді үйлесетінін және жоғары тұрақтылық пен қорғаныс қамтамасыз ететінін растайды. Сонымен қатар, микроқаттылық мәндері ЖЖЖБ процесінің параметрлеріне байланысты өзгереді, және жабыннан кейін микроқаттылықтың 1,5-2 есе артуы байқалады. 65Г болатының ZrCN жабынынан кейінгі микроқаттылығының мәні 456,6 HV болды. У8Г болаты үшін ZrCN жабынының микроқаттылығы 649,7 HV құрады. Осылайша, ZrCN жабыны 65Г және У8Г болаттарында тозуға төзімділікті арттырып, олардың қызмет ету мерзімін ұзартады.

Пайдаланылған әдебиеттер тізімі

1. Kalliopi K. Aligizaki, D. (2004), "Surface Engineering for Corrosion and Wear Resistance", *Anti-Corrosion Methods and Materials*, Vol. 51 No. 1 <https://doi.org/10.1108/acmm.2004.12851aae.001>
2. Pawlowski, L. (2008). The science and engineering of thermal spray coatings (2nd ed.). Wiley.
3. Mattox, D. M. (2010). Handbook of physical vapor deposition (PVD) processing (2nd ed.). William Andrew.
4. Ohring, M. (2002). Materials science of thin films: Deposition and structure (2nd ed.). Academic Press.
5. Pierre, A. C. (2020). Introduction to sol-gel processing. Springer Nature.
6. Molak, R. M., Araki, H., Watanabe, M., et al. (2017). Effects of spray parameters and post-spray heat treatment on microstructure and mechanical properties of warm-sprayed Ti-6Al-4V coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*, 26(4), 627–647. <https://doi.org/10.1007/s11666-016-0494-5>
7. Yuan, J., Cheng, Y., Jing, Z., et al. (2023). Properties of Al-based amorphous coatings prepared by low-temperature ЖЖЖБ spraying. *Journal of Thermal Spray Technology*, 32(6), 1338–1349. <https://doi.org/10.1007/s11666-023-01555-9>
8. Moghaddasi, M., Bozorg, M., Aghaie, E., et al. (2021). Corrosion and wear analysis of high-velocity oxy-fuel sprayed WC-10Co-4Cr and Colmonoy-6 coatings on nickel-aluminum bronze alloy substrate. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 30(12), 7564–7576. <https://doi.org/10.1007/s11665-021-05965-0>
9. Ruiz-Luna, H., Porcayo-Calderon, J., Alvarado-Orozco, J. M., et al. (2017). Influence of oxidation treatments and surface finishing on the electrochemical behavior of Ni-20Cr ЖЖЖБ coatings. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 26(11), 6064–6074. <https://doi.org/10.1007/s11665-017-3048-1>
10. Li, M., & Christofides, P. D. (2004). Feedback control of ЖЖЖБ thermal spray process accounting for powder size distribution. *Journal of Thermal Spray Technology*, 13(1), 108–120. <https://doi.org/10.1007/s11666-004-0055-1>
11. Li, C., Li, S., Liu, P., et al. (2024). Numerical simulation and sensitivity evaluation of process parameters for AC-ЖЖЖБ spraying 3D model. *JOM*. <https://doi.org/10.1007/s11837-024-06652-w>
12. Jiang, H. R., Wei, M. L., Ma, X. S., & Dong, T. C. (2019). *Journal of Thermal Spray Technology*. <https://doi.org/10.1007/s11666-019-00889-7>
13. Abubakar, A. A., Abul, F. M., Arif, S. S., & Akhtar, J. M. (2019). *Journal of Thermal Spray Technology*, 28(3), 359. <https://doi.org/10.1007/s11666-019-00828-6>
14. Zhao, X., Li, C., Li, S., Jiang, H., & Han, X. (2023). Surface coating technology, 461, 129435. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.129435>

15. Pradeep, D.G., Venkatesh, C.V. & Nithin, H.S. (2022) Review on Tribological and Mechanical Behavior in ЖЖЖБ Thermal-sprayed Composite Coatings. *J Bio Tribo Corros* 8, 30. <https://doi.org/10.1007/s40735-022-00631-x>
16. Baczynski, C., Glover, S. C. O., & Klessen, R. S. (2015). Fervent: Chemistry coupled, ionising and non-ionising radiative feedback in magnetohydrodynamic simulations.
17. Kaur, M., Singh, H., & Prakash, S. (2012). High-temperature behavior of a high-velocity oxy-fuel sprayed Cr₃C₂-NiCr coating. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 43(8), 2979–2993. <https://doi.org/10.1007/s11661-012-1118-4>
18. Janka, L., Norpoth, J., Trache, R. *et al.* (2017). ЖЖЖБ- and HVOF-Sprayed Cr₃C₂-NiCr Coatings Deposited from Feedstock Powders of Spherical Morphology: Microstructure Formation and High-Stress Abrasive Wear Resistance Up to 800 °C. *J Therm Spray Tech* 26, 1720–1731 <https://doi.org/10.1007/s11666-017-0621-y>
19. Braic M, Braic V, Balaceanu M, Zoita CN, Kiss A, Vladescu A, Popescu A, Ripeanu R (2011) Structure and properties of Zr/ZrCN coatings deposited by cathodic arc method. *Mater Chem Phys* 126:818–825. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2010.12.036>
20. Clavería, I., Lostalé, A., Fernández, A., Castell, P., Elduque, D., Mendoza, G., & Zubizarreta, C. (2019). Enhancement of tribological behavior of rolling bearings by applying a multilayer ZrN/ZrCN coating. *Coatings*, 9(7), 434. <https://doi.org/10.3390/coatings9070434>
21. Ротару, А. Н. (год). Оценка прочности стальных конструкций по результатам измерения твердости по методу Виккерса. Научный сотрудник, ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), г. Москва, РФ.
22. Anusha, K., Routara, B.C. & Guha, S. A Review on High-Velocity Oxy-Fuel (HVOF) Coating Technique. *J. Inst. Eng. India Ser. D* 104, 831–848 (2023). <https://doi.org/10.1007/s40033-022-00434-x>
23. . A. Raza, F. Ahmad, T.M. Badri, M.R. Raza, K. Malik, An influence of oxygen flow rate and spray distance on the porosity of HVOF coating and its effects on corrosion—a review. *Materials* (2022). <https://doi.org/10.3390/ma15186329>
24. S.K. Nayak, A. Kumar, T. Laha, (2022). Developing an economical wear and corrosion resistant Fe-Based metallic glass composite coating by plasma and HVOF spraying. *J. Therm. Spray Technol.* <https://doi.org/10.1007/s11666-021-01277-w>
25. A. Silvello, P. Cavaliere, S. Yin, R. Lupoi, I. Garcia Cano, S. Dosta, (2022). Microstructural, mechanical and wear behavior of HVOF and cold-sprayed high-entropy alloys (HEAs) coatings. *J. Therm. Spray Technol.* <https://doi.org/10.1007/s11666-021-01293-w>
26. M. Löbel, T. Lindner, T. Mehner, L.M. Rymer, S. Björklund, S. Joshi, T. Lampke, (2022). Microstructure and corrosion properties of AlCrFeCoNi high-entropy alloy coatings prepared by HVOF and HVOF. *J. Therm. Spray Technol.* <https://doi.org/10.1007/s11666-021-01255-2>
27. 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. doi:10.3390/coatings11050491
28. Hollstein, F., Kitta, D., Louda, P., Pacal, F., & Meinhardt, J. (2001). Investigation of low-reflective ZrCN–PVD-arc coatings for application on medical tools for minimally invasive surgery. *Surface and Coatings Technology*, 142, 1063-1068.
29. Constantin, L. R., Parau, A. C., Balaceanu, M., Dinu, M., & Vladescu, A. (2019). Corrosion and tribological behaviour in a 3.5% NaCl solution of vacuum arc deposited ZrCN and Zr–Cr–Si–C–N coatings. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 233(1), 158-169.

References

1. Kalliopi K. Aligizaki, D. (2004), "Surface Engineering for Corrosion and Wear Resistance", *Anti-Corrosion Methods and Materials*, Vol. 51 No. 1 <https://doi.org/10.1108/acmm.2004.12851aee.001>
2. Pawlowski, L. (2008). The science and engineering of thermal spray coatings (2nd ed.). Wiley.
3. Mattox, D. M. (2010). Handbook of physical vapor deposition (PVD) processing (2nd ed.). William Andrew.
4. Ohring, M. (2002). Materials science of thin films: Deposition and structure (2nd ed.). Academic Press.
5. Pierre, A. C. (2020). Introduction to sol-gel processing. Springer Nature.
6. Molak, R. M., Araki, H., Watanabe, M., et al. (2017). Effects of spray parameters and post-spray heat treatment on microstructure and mechanical properties of warm-sprayed Ti-6Al-4V coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*, 26(4), 627–647. <https://doi.org/10.1007/s11666-016-0494-5>
7. Yuan, J., Cheng, Y., Jing, Z., et al. (2023). Properties of Al-based amorphous coatings prepared by low-temperature ЖЖЖБ spraying. *Journal of Thermal Spray Technology*, 32(6), 1338–1349. <https://doi.org/10.1007/s11666-023-01555-9>
8. Moghaddasi, M., Bozorg, M., Aghaie, E., et al. (2021). Corrosion and wear analysis of high-velocity oxy-fuel sprayed WC-10Co-4Cr and Colmonoy-6 coatings on nickel-aluminum bronze alloy substrate. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 30(12), 7564–7576. <https://doi.org/10.1007/s11665-021-05965-0>

9. Ruiz-Luna, H., Porcayo-Calderon, J., Alvarado-Orozco, J. M., et al. (2017). Influence of oxidation treatments and surface finishing on the electrochemical behavior of Ni-20Cr ЖЖЖБ coatings. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 26(11), 6064–6074. <https://doi.org/10.1007/s11665-017-3048-1>
10. Li, M., & Christofides, P. D. (2004). Feedback control of ЖЖЖБ thermal spray process accounting for powder size distribution. *Journal of Thermal Spray Technology*, 13(1), 108–120. <https://doi.org/10.1007/s11666-004-0055-1>
11. Li, C., Li, S., Liu, P., et al. (2024). Numerical simulation and sensitivity evaluation of process parameters for AC-ЖЖЖБ spraying 3D model. *JOM*. <https://doi.org/10.1007/s11837-024-06652-w>
12. Jiang, H. R., Wei, M. L., Ma, X. S., & Dong, T. C. (2019). *Journal of Thermal Spray Technology*. <https://doi.org/10.1007/s11666-019-00889-7>
13. Abubakar, A. A., Abul, F. M., Arif, S. S., & Akhtar, J. M. (2019). *Journal of Thermal Spray Technology*, 28(3), 359. <https://doi.org/10.1007/s11666-019-00828-6>
14. Zhao, X., Li, C., Li, S., Jiang, H., & Han, X. (2023). Surface coating technology, 461, 129435. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.129435>
15. Pradeep, D.G., Venkatesh, C.V. & Nithin, H.S. (2022) Review on Tribological and Mechanical Behavior in ЖЖЖБ Thermal-sprayed Composite Coatings. *J Bio Tribo Corros* 8, 30. <https://doi.org/10.1007/s40735-022-00631-x>
16. Baczynski, C., Glover, S. C. O., & Klessen, R. S. (2015). Fervent: Chemistry coupled, ionising and non-ionising radiative feedback in magnetohydrodynamic simulations.
17. Kaur, M., Singh, H., & Prakash, S. (2012). High-temperature behavior of a high-velocity oxy-fuel sprayed Cr₃C₂-NiCr coating. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 43(8), 2979–2993. <https://doi.org/10.1007/s11661-012-1118-4>
18. Janka, L., Norpoth, J., Trache, R. et al. (2017). ЖЖЖБ- and HVAF-Sprayed Cr₃C₂-NiCr Coatings Deposited from Feedstock Powders of Spherical Morphology: Microstructure Formation and High-Stress Abrasive Wear Resistance Up to 800 °C. *J Therm Spray Tech* 26, 1720–1731 <https://doi.org/10.1007/s11666-017-0621-y>
19. Braic M, Braic V, Balaceanu M, Zoita CN, Kiss A, Vladescu A, Popescu A, Ripeanu R (2011) Structure and properties of Zr/ZrCN coatings deposited by cathodic arc method. *Mater Chem Phys* 126:818–825. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2010.12.036>
20. Clavería, I., Lostalé, A., Fernández, Á., Castell, P., Elduque, D., Mendoza, G., & Zubizarreta, C. (2019). Enhancement of tribological behavior of rolling bearings by applying a multilayer ZrN/ZrCN coating. *Coatings*, 9(7), 434. <https://doi.org/10.3390/coatings9070434>
21. Rotaru, A. N. (god). Otsenka prochnosti stal'nykh konstruksiy po rezul'tatam izmereniya tverdosti po metodu Vikkersa. Nauchniy sotrudnik, FGBU VNII GOChS (FTs), g. Moskva, RF.
22. Anusha, K., Routara, B.C. & Guha, S. A Review on High-Velocity Oxy-Fuel (HVOF) Coating Technique. *J. Inst. Eng. India Ser. D* 104, 831–848 (2023). <https://doi.org/10.1007/s40033-022-00434-x>
23. . A. Raza, F. Ahmad, T.M. Badri, M.R. Raza, K. Malik, An influence of oxygen flow rate and spray distance on the porosity of HVOF coating and its effects on corrosion—a review. *Materials* (2022). <https://doi.org/10.3390/ma15186329>
24. S.K. Nayak, A. Kumar, T. Laha, (2022). Developing an economical wear and corrosion resistant Fe-Based metallic glass composite coating by plasma and HVOF spraying. *J. Therm. Spray Technol.* <https://doi.org/10.1007/s11666-021-01277-w>
25. A. Silvello, P. Cavaliere, S. Yin, R. Lupoi, I. Garcia Cano, S. Dosta, (2022). Microstructural, mechanical and wear behavior of HVOF and cold-sprayed high-entropy alloys (HEAs) coatings. *J. Therm. Spray Technol.* <https://doi.org/10.1007/s11666-021-01293-w>
26. M. Löbel, T. Lindner, T. Mehner, L.M. Rymer, S. Björklund, S. Joshi, T. Lampke, (2022). Microstructure and corrosion properties of AlCrFeCoNi high-entropy alloy coatings prepared by HVAF and HVOF. *J. Therm. Spray Technol.* <https://doi.org/10.1007/s11666-021-01255-2>
27. Frank, F., Tkadletz, M., Czettel, C., & Schalk, N. (2021). Microstructure and Mechanical Properties of ZrN, ZrCN and ZrC Coatings Grown by Chemical Vapor Deposition. *Coatings*, 11(5), 491. doi:10.3390/coatings11050491
28. Hollstein, F., Kitta, D., Louda, P., Pacal, F., & Meinhardt, J. (2001). Investigation of low-reflective ZrCN–PVD-arc coatings for application on medical tools for minimally invasive surgery. *Surface and Coatings Technology*, 142, 1063-1068.
29. Constantin, L. R., Parau, A. C., Balaceanu, M., Dinu, M., & Vladescu, A. (2019). Corrosion and tribological behaviour in a 3.5% NaCl solution of vacuum arc deposited ZrCN and Zr–Cr–Si–C–N coatings. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 233(1), 158-169.

Авторлар туралы мәліметтер

№	Аты-жөні, ғылыми дәрежесі, жұмыс немесе оқу орны, қала, ел, корреспондент автордың e-mail мекенжайы, ұялы телефон нөмірі
1	Балтабаева Дилноза Эрмахаммадқызы - магистр, Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті, Түркістан қ., Қазақстан, e-mail: dilnoza.baltabayeva@ayu.edu.kz , +77074313105
	Baltabayeva Dilnoza Ermakhammadkyzy – master, Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University, Turkestan, Kazakhstan, e-mail: dilnoza.baltabayeva@ayu.edu.kz , +77074313105
	Балтабаева Дилноза Эрмахаммадқызы - магистр, Международный казахско-турецкий университет имени Ходжи Ахмеда Ясави, г. Туркестан, Казахстан, e-mail: dilnoza.baltabayeva@ayu.edu.kz , +77074313105
2	Қалдар Берік Серікұлы - бакалавр Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті, Түркістан қ., Қазақстан, e-mail: Berik2002Berik@gmail.com , +77059792631
	Kaldar Berik Serikuly - student, Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University, Turkestan, Kazakhstan, e-mail: Berik2002Berik@gmail.com , +77059792631
	Қалдар Берік Серікұлы - магистрант, Международный казахско-турецкий университет имени Ходжи Ахмеда Ясави, г. Туркестан, Казахстан, e-mail: Berik2002Berik@gmail.com , +77059792631
3	Абдурахманова Шахноза Шакирқызы – магистр, Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті, Түркістан қ., Қазақстан, e-mail: shakhnoza.abdurakhmanova@ayu.edu.kz , +77713510901
	Abdurakhmanova Shakhnoza Shakirkyzy - master , Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University, Turkestan, Kazakhstan, e-mail: shakhnoza.abdurakhmanova@ayu.edu.kz , +77713510901
	Абдурахманова Шахноза Шакирқызы – магистр, Международный казахско-турецкий университет имени Ходжи Ахмеда Ясави, г. Туркестан, Казахстан, e-mail: shakhnoza.abdurakhmanova@ayu.edu.kz , +77713510901
4	Амангельдиева Юлдуз Ойбекқызы - магистрант, Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті, Түркістан қ., Қазақстан, e-mail: yulduz.amangeldieva12345@mail.ru , +7778 640 4486
	Amangeldiyeva Yulduz Oybekqyzy - master student, Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University, Turkestan, Kazakhstan, e-mail: yulduz.amangeldieva12345@mail.ru , +7778 640 4486
	Амангельдиева Юлдуз Ойбекқызы - магистрант, Международный казахско-турецкий университет имени Ходжи Ахмеда Ясави, г. Туркестан, Казахстан, e-mail: yulduz.amangeldieva12345@mail.ru , +7778 640 4486
5	Эртаев Нұрсұлтан Сұлтанбайұлы - магистрант, Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті, Түркістан қ., Қазақстан, e-mail: nurs.ertaev@gmail.com , +77763187990
	Ertaev Nursultan Sultanbayuly - master's student, Turkestan, Kazakhstan, Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University, e-mail: nurs.ertaev@gmail.com , +77763187990
	Эртаев Нұрсұлтан Сұлтанбайұлы - Международный казахско-турецкий университет имени Ходжи Ахмеда Ясави, г. Туркестан, Казахстан, e-mail: nurs.ertaev@gmail.com , +77763187990