

Қалдар Б.С.¹, Патчаханов Д.², Абдужаппаров Ш.³, Амангелдиева Ю.О.⁴,
Камбарбеков С.⁵, Мұсахан Н.П.⁶

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

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

³ бакалавр, Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті,
(Қазақстан, Түркістан қ.), e-mail: sukrabduzapparov@gmail.com

⁴ магистрант, Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті,
(Қазақстан, Түркістан қ.), e-mail: yulduz.amangeldiyeva@ayu.edu.kz *

⁵ докторант, Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті,
(Қазақстан, Өскемен қ.), e-mail: sardor.kambarbekov1@gmail.com

⁶ докторант, Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті,
(Қазақстан, Түркістан қ.), e-mail: nurken.mussakhan@ayu.edu.kz

**HVOF ӘДІСІМЕН АЛЫНҒАН ЖОҒАРЫ БЕРІКТІ Cr_3C_2 -NiCr ЖАБЫНДАРДЫҢ ҚҰРЫЛЫМДЫҚ
ФАЗАЛЫҚ ТҮРЛЕНУЛЕРІН ЗЕРТТЕУ
INVESTIGATION OF THE STRUCTURAL PHASE STATE OF HIGH-STRENGTH Cr_3C_2 -NiCr
COATINGS OBTAINED BY HVOF METHOD
ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ ВЫСОКОПРОЧНЫХ Cr_3C_2 -NiCr
ПОКРЫТИЙ ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ HVOF**

Аңдатпа. Жұмыста құрылымдық-фазалық және микроқұрылымдық сипаттамасы бар жоғары жылдамдықты газжалынды бүрку (HVOF) әдісімен Э110 цирконий қорытпасына алынған Cr_3C_2 -NiCr жабынының құрамының қалыптасуы зерттелді. Мақсаты цирконий қорытпасы үшін HVOF технологиялық іске асырылуын бағалау және қасиеттердің нысаналы жиынтығына әсер ететін факторларды анықтау болып табылады. Фазалық талдау Cr_3C_2 карбиді, Cr_{23}C_6 төменгі карбиді және CrNi_3 интерметаллиді бар жабындардың көп фазалы жай-күйін көрсетті. Энергодисперсиялық талдаумен деректері бойынша 10-78 мкм қалыңдығы біркелкі қабат түзілген, ол бағаналы морфологиясыз және «негіз-жабын» шекарасында үздіксіз байланысқан, бұл қанағаттанарлық адгезияны көрсетеді. А үлгісінің спектрлік талдауы Ni-78.504%, Cr-17.032%, O-3.447%, C-1.017%; В үлгісінде, Ni-66.405%, Cr-29.286%, O-3.727%, C-0.581% көрсетеді. Ал оттектің болуы (3-4%) ашық атмосфера жағдайында бүрку жүргізілуімен байланысты. Сонымен қатар, негізінен өтпелі аймақта бөлішекаралық және дақ ішілік кеуектер, жергілікті микрожарықтар мен қабаттардың ажырау аймақтары анықталды; оттегінің мөлшері шамамен 3-4% ашық атмосферада бүрку кезінде шашырандылардың ішінара тотығуымен байланысады. Нәтижелердің жиынтығы HVOF әдісінің Э110 негізінде Cr_3C_2 -NiCr жабындарын алу үшін қолдануға жарамдылығын растайды және кеуектілікті төмендету тотығуды шектеу және Cr_3C_2 фазасының үлесін тұрақтандыру үшін режимдерді оңтайландыру қажеттігін көрсетеді.

Негізгі сөздер: Cr_3C_2 -NiCr жабындары, құрылымдық-фазалық талдау, HVOF, XRD.

Abstract. The study investigated the formation of the composition of a Cr_3C_2 -NiCr coating obtained by the high-velocity oxy-fuel (HVOF) spraying method on the E110 zirconium alloy using structural-phase and microstructural characterization. The aim is to evaluate the technological feasibility of the HVOF process for the zirconium alloy and to identify factors influencing the achievement of the target set of properties. Phase analysis revealed a multiphase state of the coatings, including Cr_3C_2 carbide, Cr_{23}C_6 lower carbide, and CrNi_3 intermetallic compound. According to energy-dispersive analysis, a uniform layer with a thickness of 10–78 μm was formed, without columnar morphology and with continuous bonding at the “substrate–coating” interface, indicating satisfactory adhesion. Spectral analysis of sample A showed: Ni – 78.504%, Cr – 17.032%, O – 3.447%, C – 1.017%; sample B showed: Ni – 66.405%, Cr – 29.286%, O – 3.727%, C – 0.581%. The presence of oxygen (3–4%) is associated with spraying in an open atmosphere. In addition, mainly in the transition zone, intergranular and intragranular pores, local microcracks, and layer separation areas were detected; the oxygen content of about 3–4% is due to partial oxidation of the sprayed particles during spraying in an open atmosphere. The overall results confirm the suitability of the HVOF method for obtaining Cr_3C_2 -NiCr coatings on the E110 base and indicate the need to optimize parameters to reduce porosity, limit oxidation, and stabilize the Cr_3C_2 phase fraction.

Keywords: Cr_3C_2 -NiCr coating, structural and phase analysis, HVOF, XRD.

Аннотация. В работе исследовано формирование состава покрытия $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$, нанесённого методом высокоскоростного газопламенного напыления (HVOF) на сплав циркония Э110 с использованием структурно-фазового и микроструктурного анализа. Целью является оценка технологической реализуемости HVOF для циркониевого сплава и выявление факторов, влияющих на достижение целевого комплекса свойств. Фазовый анализ показал многофазное состояние покрытий, включающее карбид Cr_3C_2 , низший карбид Cr_{23}C_6 и интерметаллид CrNi_3 . По данным энергодисперсионного анализа сформировался равномерный слой толщиной 10–78 мкм, без колонной морфологии и с непрерывным соединением на границе «основа–покрытие», что указывает на удовлетворительную адгезию. Спектральный анализ образца А показал: Ni – 78.504%, Cr – 17.032%, O – 3.447%, C – 1.017%; образца В: Ni – 66.405%, Cr – 29.286%, O – 3.727%, C – 0.581%. Наличие кислорода (3–4%) связано с проведением напыления в открытой атмосфере. Кроме того, преимущественно в переходной зоне выявлены межзеренные и внутрозеренные поры, локальные микропреципины и участки расслоения слоёв; содержание кислорода около 3–4% обусловлено частичным окислением распылённых частиц при напылении в открытой атмосфере. Совокупность результатов подтверждает пригодность метода HVOF для получения покрытий $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ на основе Э110 и указывает на необходимость оптимизации режимов для снижения пористости, ограничения окисления и стабилизации доли фазы Cr_3C_2 .

Ключевые слова: покрытие $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$, структурно-фазовый анализ, HVOF, XRD.

Кіріспе

$\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ жүйесінің жабындары жоғары температурада және агрессивті ортада жұмыс істейтін бөлшектерді коррозиядан және тозудан қорғау үшін кеңінен қолданылады [1,2]. Зерттеудің маңызды бағыты - бірегей физика - химиялық және механикалық қасиеттер үйлесіміне ие композиттер мен жабындарды әзірлеу. Атап айтқанда, жоғары температура, механикалық жүктемелер, коррозиялық белсенді орта және радиация жағдайларына төзімді материалдарға ерекше назар аударылады. Бұл жабындардың тиімділігі NiCr металл матрицасының Cr_3C_2 қатты карбидтік фазасын сенімді бекітуіне, сондай-ақ аз қуыстылығы бар жоғары тығыздықты жабын құрылымын қалыптастыруына байланысты [3]. Мұндай жабындарды алу, әдетте, термиялық бүрку әдістерімен жүзеге асырылады: атмосфералық плазмалық бүрку (APS), жоғары жылдамдықты оттек-отын/ауа-отын бүрку (HVOF/HVAF) және детонациялық бүрку [4-6].

$\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ композициялық жабындарын алудың технологиялық тұрғыдан болашағы зор әрі тиімді тәсілдерінің бірі - термиялық бүрку. Оның ішінде плазмалық бүрку, детонациялық бүрку және ең алдымен, жоғары жылдамдықты газ-отынмен бүрку (HVOF) ерекше атап өтіледі. HVOF процесі отын-оттек қоспасының үздіксіз жануына және де Лаваль саптамасы арқылы үдетілетін жоғары энергиялы асадыбыстық газ ағынын түзуге негізделген. Осы ағынға ұнтақ қоректендіргіш арқылы материал енгізіледі; бөлшектер қыздырылып, жоғары жылдамдыққа дейін үдетіледі және субстратқа бағыттталып, соққы-пластикалық жайылу арқылы тығыз ламеллярлы қабат түзеді. Термогазодинамикасы мен ағын кинематикасы тұрғысынан HVOF сұлбасы газ-генераторлық жану камерасы мен де Лаваль саптамасының жұмыс қағидаларына ұқсас [7-9].

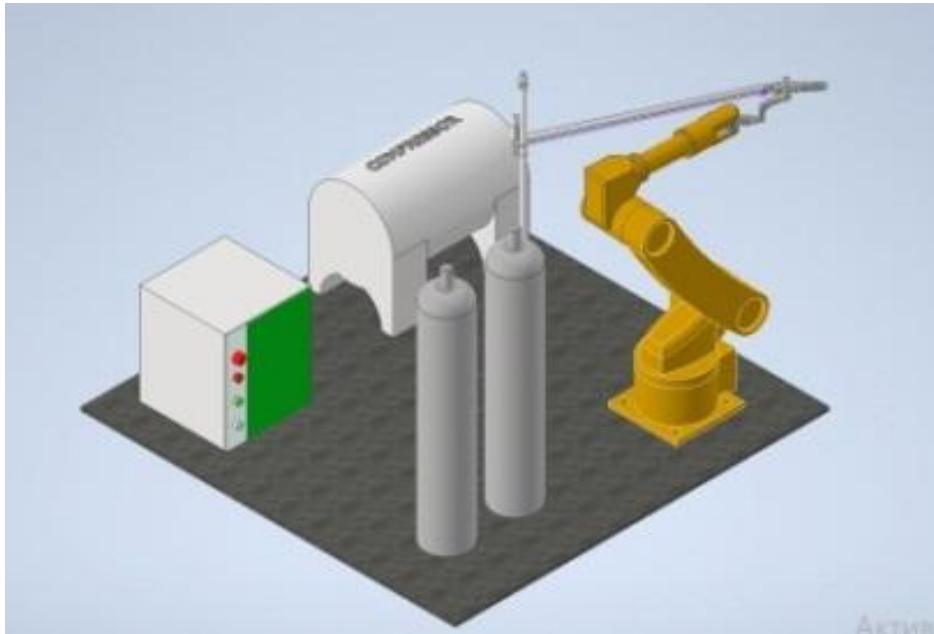
$\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ ұнтақтарынан жабын қалыптастыру барысында химиялық құрамның ығысуы жиі байқалады: жоғары температурадағы газ-ағынмен өзара әрекеттесу кезінде Cr_3C_2 карбидінің декарбюризациясы мен тотығуы жүреді, ал Cr және C атомдары NiCr матрицасына диффузиялық енуі мүмкін [10-16]. Бұл құбылыстар жалын құрамы мен О/Г қатынасына, бөлшек өлшеміне және ұшу уақытына тәуелді. O_2 артық болғанда немесе $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2$ парциалдық қысымдары жоғары болғанда бастапқы Cr_3C_2 фазасы төмен көміртекті карбидтерге, алдымен Cr_7C_3 , әрі қарай Cr_{23}C_6 түрленуі ықтимал; сонымен қатар Cr_2O_3 және (Ni,Cr)-оксидтер түзіледі [10-15]. Бөлшектің «серпімді шегінуі» негізінен жабысып қалу коэффициентіне әсер етеді; құрамдық өзгерістерге оның ықпалы жанама және процесс параметрлері арқылы анықталады. Қабат түзу кезінде карбид бөлшектерінің тотығуы мен декарбюризация өнімдерінің NiCr матрицасына енуі бір мезгілде жүруі мүмкін [16]. Cr_3C_2 фазасы эрозияға, коррозияға және адгезиялық/абразивтік тозуға қарсы жоғары тиімді компонент болғандықтан, оның көміртексізденуі қалаусыз. Жоғары карбид үлесін сақтау

үшін төмен температуралы, инертті/тотықсыздандырғыш орта беретін технологиялық шешімдер қолданылады: HVAF, қоршамаланған HVOF, отынға бай режим ($\phi \geq 1$), тұру уақытын қысқарту және бөлшек фракциясын оңтайлау [10-16]. Перспективалы тәсілдердің бірі - құрамы қалыңдық бойымен басқарылатын градиенттік жабындарды қалыптастыру; олар субстрат-жабын шекарасындағы фазааралық кернеулерді төмендетіп, жоғары жүктемелерде сенімді жұмыс істей алады. Мұндай градиенттер детонациялық бүркумен ғана емес, HVOF/HVAF параметрлерін сатылы өзгерту арқылы да алынады [17].

Жоғарыда баяндалған алғышарттарды ескере отырып, осы жұмыстың мақсаты - Э110 маркалы цирконий қорытпасынан жасалған субстратқа HVOF әдісімен $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ жабындарын алу процесін зерттеу және алынған жабындардың фазалық құрамы мен микроқұрылымын талдау.

Материалдар мен тәсілдер

$\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ хром негізіндегі наноөлшемді ұнтақты және «Термика-3» қондырғысындағы жоғары жылдамдықты газ-жалынды бүрку (HVOF) әдісін қолдана отырып жүргізілген зерттеу (1-сурет) жоғары беріктігі бар жабындарды қолдану процесін оңтайландыру жолындағы маңызды қадам болып табылады.



Сурет 1. Жоғары жылдамдықты газ-жалынды бүруге арналған автоматтандырылған қондырғы (HVOF)

Бөлшектердің жоғары жылдамдықты тұндыру әдісі төмен тотығу деңгейімен және бүрікілген қабатта қалдық қысушы кернеулерінің пайда болуымен сипатталады; жиынтықта бұл бөлшектер арасындағы байланыстардың жоғары тығыздығы мен беріктігіне әкеледі. HVOF технологиясы $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ және WC-Co типті жабындардың соққыға төзімділігі мен тозуға төзімділігінің қажетті мәндерін қамтамасыз етеді [18].

Бүрку цирконий Э110 субстраттарында орындалды. Субстраттардың беті механикалық өңдеу және тазалау әдістерімен дайындалып, содан кейін құммен тазалау жүргізілді. Жабын материалы ретінде HVOF процесі үшін оңтайлы химиялық және гранулометриялық құрамы бар $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ ұнтағы қолданылды. Бүрку параметрлерінің негізгі мәндері 1-кестеде келтірілген.

Алынған $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ негізіндегі жабындардың фазалық құрамы $\text{Cu-K}\alpha$ сәулелерімен X'Pert PRO рентгендік дифрактометрінде, 40 кВ кернеу және 30 мА ток күшінде зерттелді. Дифрактограммаларды интерпретациялау HighScore бағдарламалық жасақтамасының көмегімен орындалды; өлшеулер $20^\circ\text{-}90^\circ$ бұрышаралық диапазонында, қадам $0,02^\circ$ және санау уақыты 0,5 с/қадам параметрлерінде жүргізілді.

Сканерлеуші электрондық микроскопияны қолдану оптикалық микроскопиямен салыстырғанда айқындық тереңдігінің жоғары болуымен, сондай-ақ бақылау бұрышын өзгерте отырып бейнелер алу мүмкіндігімен негізделеді. Бүркелген жабындарды JSM-6060 (JEOL, Токио, Жапония) сканерлеуші электрондық микроскопында энергия-дисперсиялық рентгендік спектрометриясымен зерттеу олардың микроқұрылымы мен химиялық құрамы туралы түсініктерді кеңейтеді. Бұл тәсіл фазалардың біртектілігін және таралуының біркелкілігін бағалауға мүмкіндік береді, ал бұл өз кезегінде нақты пайдалану жағдайларындағы механикалық және трибологиялық қасиеттерді болжау үшін аса маңызды.

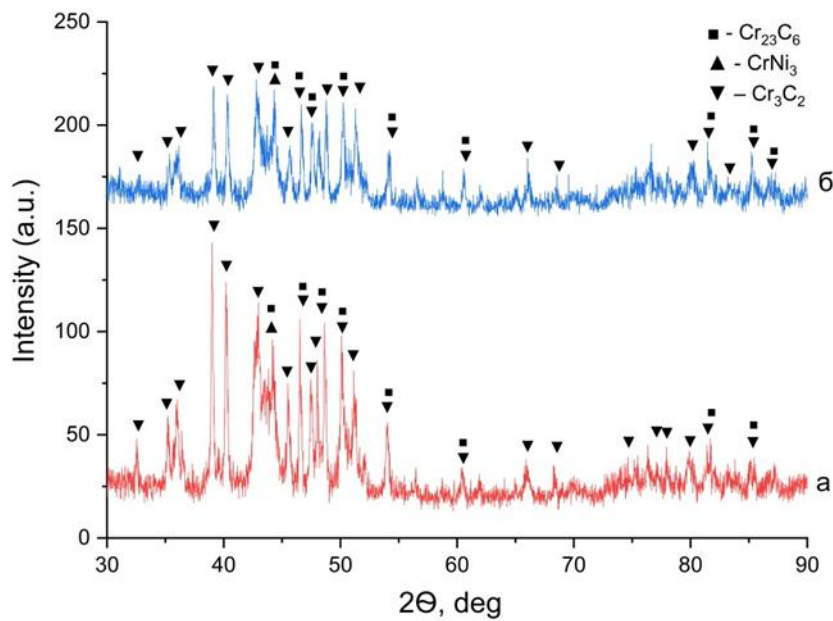
Кесте 1. Жабындарды жағу параметрлері

№	Арақашықтық	Пропан	Ауа қысымы	Оттегі	Ұнтақ
Үлгі а	35 см	1,7 бар	3,3 бар	2,8 бар	$\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$
Үлгі б	35 см	1,7 бар	3,7 бар	2,8 бар	$\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$

Нәтижелер

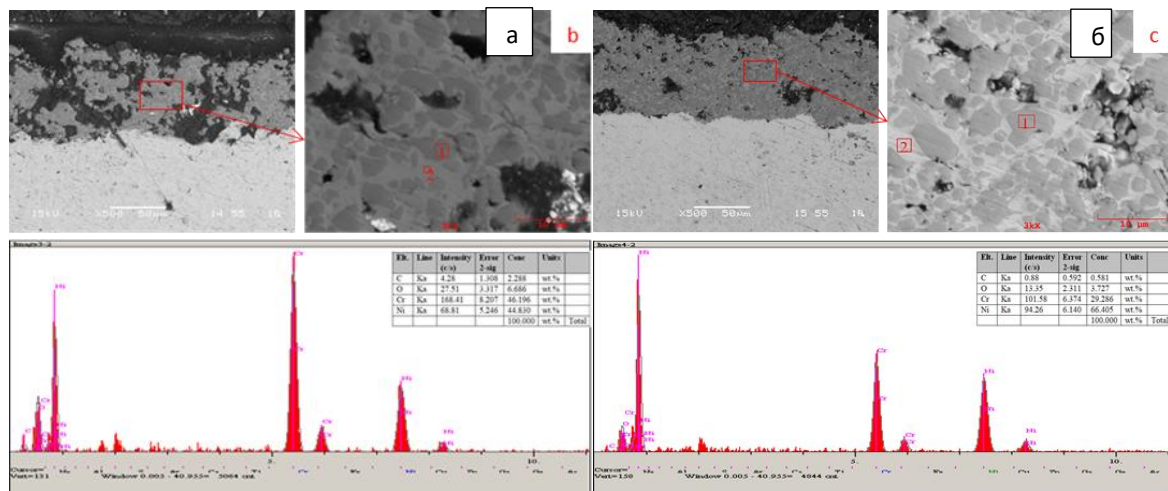
Рентгендік құрылымдық талдау деректеріне сәйкес, бүркілген жабындарда келесі доминантты фазалар 2-суретте көрсетілгендей қалыптасады. Бекітілген хром карбиді Cr_{23}C_6 кубтық кристалды тормен, кеңістіктік тобы $Fm\text{-}3m$, тор параметрі $a=10.6600 \text{ \AA}$. Сондай-ақ, Cr_3C_2 орторомбты торлы карбид ($Pnma$) және параметрлері $a=5.5400 \text{ \AA}$, $b=2.8330 \text{ \AA}$, $c=11.4940 \text{ \AA}$, жоғары механикалық және физикалық сипаттамаларымен танымал, бұл оның өнеркәсіптік қосымшалардың кең ауқымы үшін құндылығын айқындайды. Бұдан бөлек, жоғары балқу температурасымен, коррозияға төзімділігімен, жақсы жылу өткізгіштігімен және беріктігімен сипатталатын кубтық торы ($Fm\text{-}3m$) және $A=3.5400 \text{ \AA}$ параметрі бар CrNi_3 фазасы анықталды.

Аталған тұжырымдар микроқұрылымды және фазалардың таралуын егжей-тегжейлі сипаттауға мүмкіндік беретін жергілікті СЭМ талдауының нәтижелеріне сәйкес келеді. Э110 цирконий қорытпасында HVOF әдісімен жасалған $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ жабындарының фазалық құрамын түсіну оларды мақсатты оңтайландыру және жоғары температурада, қарқынды абразивті тозуда және коррозиялық ортада қолдану үшін өте маңызды [19].



Сурет 2. Э110 қорытпасында HVOF әдісімен алынған $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ жабындарының дифрактограммалары

3-суретте көрсетілгендей, қолданылған бүрку режимдері тығыз және біркелкі қабаттың түзілуін қамтамасыз ететіндігі анықталды; оның қалыңдығы процестің параметрлеріне байланысты 10-78 мкм аралығында өзгереді. Жабын үлгілердің бүкіл бетін біркелкі қаптайды. Субстратпен жабын арасында қабатаралық ажырау байқалмайды, бұл сенімді адгезияны көрсетеді.



Сурет 3. $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ жабындарының көлденең морфологиясының СЭМ бейнесі және EDX талдауы

Жабын-субстрат шекарасында айқын байқалады, бірақ кейбір жерлерде ақаулар байқалады - жергілікті қабаттану және микрожарықшақтар анықталды. Жабынның айқын кеуектілігі байқалады. Кеуектер негізінен өтпелі аймақта және жабынның денесінде таралған, олар бөлшектер арасында (газдың қосылуы мен шөгу әсеріне байланысты) кездеседі. Олардың болуы балқыманың толық тығыздалмауын, бүрку кезінде тотығуды көрсетеді, бұл микрокаттылықты төмендетуі мүмкін сонымен қатар спектрлік талдау

нәтижелері кесте 2 көрсетілген. Бұл жағдайда субстратпен шекарадан алыстаған сайын жабын құрылымының біркелкілігі жоғары болады.

Кесте 2. Үлгілердің спектрлік талдауы

№	Ni	Cr	O	C
Үлгі а	78.504%	17.032%	3.447%	1.017%
Үлгі б	66.405%	29.286%	3.727%	0,581%

Жабындардағы оттегінің болуы процестің ашық атмосфера жағдайында жүргізілгендігімен түсіндірілуі мүмкін, онда бүркілген материал ауадағы оттегімен оңай әрекеттеседі. Нәтижесінде энергодисперсиясын талдау металл жабынның бірізді қабаттарының қалыптасу заңдылығын растады.

Қорытынды

HVOF әдісі Э110 цирконий қорытпасына бүркілген Cr_3C_2 -NiCr құрамды көпфазалы қабаттың түзілуін қамтамасыз етеді. XRD деректері бойынша жабындарда Cr_3C_2 , Cr_{23}C_6 және CrNi_3 фазалары анықталған; нәтижелер СЭМ/EDX бойынша микроқұрылымның жергілікті сипаттамасымен және элементтердің таралуына сәйкес келеді. Cr_{23}C_6 кубтық кристалды тормен сондай-ақ, Cr_3C_2 орторомбты торлы карбид. Қабаттың морфологиясы тұтастай біркелкі; көптеген аймақтардағы "субстрат-жабын" шекарасындағы үздіксіздік сақталған, бұл қанағаттанарлық адгезияны көрсетеді.

Нәтижелер жиынтығы Э110 қорытпасында Cr_3C_2 -NiCr жабындарын қажетті тұтастық және адгезиямен алудың технологиялық жүзеге асырылуын растайды. Бөлшекаралық жергілікті микрожарықшақтар және қабаттану аймақтары белгіленген. А үлгісінің спектрлік талдауы Ni-78.504%, Cr-17.032%, O-3.447%, C-1.017%; В үлгісінде, Ni-66.405%, Cr-29.286%, O-3.727%, C-0,581% көрсетеді. Ал оттектің болуы (3-4%) ашық атмосфера жағдайында бүрку жүргізілуімен байланысты.

Мұндай жабындар жоғары температура, абразивтік тозу және коррозиялық орта жағдайында пайдаланылатын жабдық элементтерінде, жоғары температураларда, абразивтік тозу мен коррозиялық әсерлер жағдайында жұмыс істейтін бөлшектерде қолданылады.

Алғыс

Бұл зерттеуді Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті қаржыландырады. (грант No AP19579179).

Әдебиеттер тізімі

1. Lu, H., Shang, J., Jia, X., Li, Y., Li, F., Li, J., & Nie, Y. (2020). Erosion and corrosion behavior of shrouded plasma sprayed Cr_3C_2 -NiCr coating. *Surface and Coatings Technology*, 388, 125534.
2. Kuruba, M., Gaikwad, G., Natarajan, J., & Koppad, P. G. (2022). Effect of carbon nanotubes on microhardness and adhesion strength of high-velocity oxy-fuel sprayed NiCr- Cr_3C_2 coatings. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 236(1), 86-96.
3. Reddy, N. C., Koppad, P. G., Reddappa, H. N., Ramesh, M. R., Babu, E. R., & Varol, T. E. M. E. L. (2019). Hot corrosion behaviour of HVOF sprayed Ni3Ti and Ni3Ti+(Cr_3C_2 + 20NiCr) coatings in presence of Na2SO4-40% V2O5 at 650 C. *Surface Topography: Metrology and Properties*, 7(2), 025019.
4. Reddy, N. C., Ajay Kumar, B. S., Ramesh, M. R., & Koppad, P. G. (2018). Microstructure and adhesion strength of Ni3Ti coating prepared by mechanical alloying and HVOF. *Physics of Metals and Metallography*, 119(5), 462-468.
5. Pogrebnnyak, A. D., & Tyurin, Y. N. (2005). Modification of material properties and coating deposition using plasma jets. *Physics-Uspekhi*, 48(5), 487.

6. Li, C. J., Ji, G. C., Wang, Y. Y., & Sonoya, K. (2002). Dominant effect of carbide rebounding on the carbon loss during high velocity oxy-fuel spraying of Cr₃C₂-NiCr. *Thin Solid Films*, 419(1-2), 137-143.
7. Tejero-Martin, D., Rezvani Rad, M., McDonald, A., & Hussain, T. (2019). Beyond traditional coatings: a review on thermal-sprayed functional and smart coatings. *Journal of thermal spray technology*, 28(4), 598-644.
8. Yu, J., Liu, X., Yu, Y., Li, H., Liu, P., Sun, R., ... & Li, P. (2021). Numerical analysis of high-velocity oxygen fuel thermal-spray process for Fe-based amorphous coatings. *Coatings*, 11(12), 1533.
9. Kuruba, M., Gaikwad, G., & Shivalingappa, D. (2022). Hot-corrosion behaviour of CNT reinforced Cr₃C₂-NiCr coatings working under high-temperature sprayed by HVOF method. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 236(12), 2372-2383.
10. Rakhadilov, B. K., Tyurin, Y., Kakimzhanov, D., Baizhan, D., Kolisnichenko, O., & Zhurero, L. (2021). Deposition of duplex Cr₃C₂-NiCr coatings on steel using a combined technique of gas detonation spraying and pulse-plasma treatment. *High Temperature Material Processes: An International Quarterly of High-Temperature Plasma Processes*, 25(4).
11. Lin, L., Hu, S. A., Hu, Y. B., Xu, G. J., Jiao, H. Y., & Weng, C. S. (2020). Experimental study on the detonation process of a pulse detonation engine with ionized seeds. *Defence Technology*, 16(1), 178-187.
12. Matikainen, V., Bolelli, G., Koivuluoto, H., Honkanen, M., Vippola, M., Lusvardi, L., & Vuoristo, P. (2017). A study of Cr₃C₂-based HVOF-and HVOF-sprayed coatings: microstructure and carbide retention. *Journal of Thermal Spray Technology*, 26(6), 1239-1256.
13. Akamatsu, H., Ikeda, T., Azuma, K., Fujiwara, E., & Yatsuzuka, M. (2001). Surface treatment of steel by short pulsed injection of high-power ion beam. *Surface and coatings technology*, 136(1-3), 269-272.
14. Kakimzhanov, D. N., Rakhadilov, B. K., Tyurin, Y. N., Kolisnichenko, O. V., Zhurero, L. G., & Dautbekov, M. K. (2021). Influence of pulsed plasma treatment on phase composition and hardness of Cr₃C₂-NiCr coatings. *Eurasian Journal of Physics and Functional Materials*, 5(1), 45-51.
15. Ji, G. C., Li, C. J., Wang, Y. Y., & Li, W. Y. (2006). Microstructural characterization and abrasive wear performance of HVOF sprayed Cr₃C₂-NiCr coating. *Surface and Coatings Technology*, 200(24), 6749-6757.
16. Ulianitsky, V. Y., Batraev, I. S., Shtertser, A. A., Dudina, D. V., Bulina, N. V., & Smurov, I. (2018). Detonation spraying behaviour of refractory metals: Case studies for Mo and Ta-based powders. *Advanced Powder Technology*, 29(8), 1859-1864.
17. Rakhadilov, B., Maulet, M., Abilev, M., Sagdoldina, Z., & Kozhanova, R. (2021). Structure and tribological properties of Ni-Cr-Al-based gradient coating prepared by detonation spraying. *Coatings*, 11(2), 218.
18. Celik, I., & Benli, B. (2024). The effect of WC-12Co and CrC-NiCr hard coatings applied by HVOF method on the microstructure, mechanical, and surface properties of steel. *Metallurgical Research & Technology*, 121(3), 318.
19. Zhou, W., Zhou, K., Li, Y., Deng, C., & Zeng, K. (2017). High temperature wear performance of HVOF-sprayed Cr₃C₂-WC-NiCoCrMo and Cr₃C₂-NiCr hardmetal coatings. *Applied Surface Science*, 416, 33-44.

Авторлар туралы мәлімет

№	Аты-жөні, ғылыми дәрежесі, жұмыс немесе оқу орны, қала, ел, автордың e-mail мекенжайы, ұялы телефон нөмірі
1	Қалдар Б. С. – магистрант, Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті, Түркістан қ., Қазақстан, e-mail: Berik2002Berik@gmail.com , +77059792631
	Kaldar B.S. - master's student, Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University, Turkestan, Kazakhstan, e-mail: Berik2002Berik@gmail.com , +77059792631
	Қалдар Б.С. – магистрант, Международный казахско-турецкий университет имени Ходжи Ахмеда Ясави, г. Туркестан, Казахстан, e-mail: Berik2002Berik@gmail.com , +77059792631
2	Патчаханов Д. – бакалавр, Қожа Ахмет Ясауи атындағы халықаралық қазақ-түрік университеті, Түркістан қ., Қазақстан, e-mail: itsxxdi@gmail.com , +77086745854
	Patchakhanov D. - bachelor, International Kazakh-Turkish University named after Khoja Akhmet Yasawi, Turkistan, Kazakhstan, e-mail: itsxxdi@gmail.com , +77086745854
	Патчаханов Д. - бакалавр, Международный казахско-турецкий университет имени Ходжи Ахмеда Ясави, г. Туркестан, Казахстан, e-mail: itsxxdi@gmail.com , +77086745854
3	Абдужәппаров Ш. – бакалавр, Қожа Ахмет Ясауи атындағы халықаралық қазақ-түрік университеті, Түркістан қ., Қазақстан, e-mail: sukrabduzapparov@gmail.com , +77715677225
	Abduzhapparov Sh. - bachelor's, Khoja Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University, Turkistan, Kazakhstan, e-mail: sukrabduzapparov@gmail.com , +7 771 567 7225
	Абдужәппаров Ш. – бакалавр, Международный казахско-турецкий университет имени Ходжи Ахмеда Ясави, г. Туркестан, Казахстан e-mail: sukrabduzapparov@gmail.com , +7 771 567 7225
4	Амангельдиева Ю. О. – магистрант, Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік

	университеті, Түркістан қ., Қазақстан, e-mail: yulduz.amangeldieva12345@mail.ru , +7778 640 4486
	Amangeldiyeva Y. O. - master's 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	Камбарбеков С. - докторант, Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, (Қазақстан,Өскемен қ.),e-mail: sardor.kambarbekov1@gmail.com , +77006582443
	Kambarbekov S. - doctoral student, Sarsen Amanzholov East Kazakhstan Technical University, Oskemen, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan. e-mail: sardor.kambarbekov1@gmail.com , +77006582443
	Камбарбеков С. - докторант, Восточно-Казахстанский технический университет имени Сарсена Аманжолова, г. Усть-Каменогорск , Казахстан. e-mail: sardor.kambarbekov1@gmail.com , +77006582443
6	Мұсахан Н. П. – докторант, Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті, Түркістан қ., Қазақстан, e-mail: nurken.mussakhan@ayu.edu.kz , +7778 613 3168
	Mussakhan N. P. - doctoral student, Akhmet Yassawi International Kazakh- Turkish University, Turkestan, Kazakhstan, e-mail: nurken.mussakhan@ayu.edu.kz , +7778 613 3168
	Мұсахан Н. П. – докторант,, Международный казахско-турецкий университет имени Ходжи Ахмеда Ясави, г. Туркестан, Казахстан, e-mail: nurken.mussakhan@ayu.edu.kz , +7778 613 3168