

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2026-3-46-55>
ӨОЖ 621.793.71

AISI 321 БОЛАТ НЕГІЗДЕРІНДЕГІ $Al_{65}Cu_{20}Fe_{15}$ ЖАБЫНДАРЫНЫҢ ТРИБОЛОГИЯЛЫҚ СИПАТТАМАЛАРЫНА HVOF ПРОЦЕСІ ПАРАМЕТРЛЕРІНІҢ ӘСЕРІ

Д. Э. Балтабаева^{1*}, Ш. Курбанбеков², Л. Баятанова¹, А. Согун³, Ю. Амангельдиева¹

¹Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен, Қазақстан

²Қ. А. Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті, Түркістан, Қазақстан

³Сакаръя университеті, Түркия

* Байланыс үшін e-mail: dilnoza.baltabayeva@ayu.edu.kz

Бұл зерттеуде жоғары жылдамдықты оттегі-отын бүрку (HVOF) әдісі параметрлерінің, әсіресе оттегі қысымына баса назар аударып, $Al_{65}Cu_{20}Fe_{15}$ жабындарының микроқұрылымы мен трибологиялық өнімділігіне әсері жүйелі түрде зерттелді. Жабындар екі оттегі қысымында (3,0 және 3,5 бар) алынды, ал басқа барлық бүрку параметрлері тұрақты болды. Микроқұрылымдық сипаттама сканерлеуші электронды микроскопия (SEM) және энергия-дисперсиялық спектроскопия (EDS) көмегімен жүргізілді. Ал квазикристалды және кристалды фазалардың үлесін бағалау үшін фазалық құрам талданды. Трибологиялық қасиеттер үйкеліс коэффициентін үздіксіз бақылай отырып, шарлы-дискілі сырғанау сынағы арқылы бағаланды. Алынған нәтижелер оттегі қысымының жабын тығыздығына, фазалық құрамына және трибопленканың пайда болуына айтарлықтай әсер ететінін көрсетті. Осылайша, оттегінің 3,5 бар қысымында бүрку арқылы тұндырылған жабын ең оңтайлы сипаттамаларды көрсетті (тұрақты үйкеліс коэффициенті 0,55-0,60 және тұрақты тозу). Бұл квазикристалды фаза үлесінің жоғары болуымен және біртекті трибокабықшаның түзілуімен түсіндіріледі. Осылайша, талдау үлгілерді 3,5 бар оттегі қысымында өңдеу оңтайлы процесс режимі екенін көрсетті. Бұл тығыздық микроқұрылымның пайда болуын және жабынның трибологиялық қасиеттерінің жақсаруын қамтамасыз етеді.

Түйін сөздер: квазикристалдар, $Al-Cu-Fe$, HVOF, AISI 321, трибология, XRD, SEM, үйкеліс коэффициенті, болат, EDS.

КІРІСПЕ

Қазіргі заманғы материалтану саласындағы экстремалды жағдайларда – жоғары температурада, абразивті жүктемелерде және агрессивті ортаға ұшырауда қолдануға арналған тозуға және коррозияға төзімді жабындарды әзірлеуге ерекше назар аударылады. Сондықтан, өзекті міндеттердің бірі – аэроғарыш, энергетика және машина жасау салаларында қолданылатын құрылымдық материалдардың беріктігін арттыру мен ұзақ мерзімді жұмыс жасауға бейімдеу [1]. Бұл мәселені шешу үшін жылдам кристалдану әдістерімен өндірілген жабындардың қолданысы барған сайын артып келеді. Себебі кристалды, аморфты және квазикристалды фазалардың бірегей үйлесімі бар микроқұрылымдарды қалыптастыруға мүмкіндік береді [2]. Квазипериодты атомдық реттілігі бар квазикристалды материалдар ерекше қасиеттердің үйлесіміне ие: жоғары қаттылық, төмен үйкеліс коэффициенті, жоғары коррозияға төзімділік және 800 °C дейінгі температурада жұмыс істейді [3]. Өртүрлі квазикристалды түзетін қорытпалардың ішінде $Al-Cu-Fe$ жүйесі, әсіресе тұрақты квазикристалды фазаны құрайтын $Al_{65}Cu_{20}Fe_{15}$ қорытпасы ерекше қызығушылық тудырады [4]. Бұл қорытпаға негізделген жабындар 700–1500 HV диапазонындағы микроқаттылықпен, төмен үйкеліс коэффициентімен (күрғақ үйкеліс кезінде 0,1–

ге дейін) және жоғары адгезиямен сипатталады. Бұл оларды қарқынды тозу жағдайында жұмыс істейтін беттерді қорғау үшін қолдану әлеуетін арттырады [5]. Квазикристалды жабындарды қондыруға арналған қолданыстағы технологиялардың ішінде HVOF бүрку ең тиімді болып саналады [6]. Бұл әдіс бөлшектердің жоғары жылдамдығымен (700 м/с дейін) және субстрат температурасының салыстырмалы түрде төмен (100–200 °C дейін) болуымен ерекшеленеді, термиялық кернеулерді азайтады және қорытпаның бастапқы фазалық құрылымын сақтайды. Бөлшектердің кинетикалық энергиясының жоғары болуы мен олардың оттегімен шектеулі жанасуы тотығуды неғұрлым азайтып, тығыздығы жоғары жабынның қалыптасуын қамтамасыз етеді [6]. Бұл зерттеуде субстрат ретінде 08X18H10T (AISI 321) тот баспайтын болаты пайдаланылды, ол коррозия мен ыстыққа жоғары төзімділігінің және созылғыштық қасиетінің үйлесіміне байланысты өнеркәсіпте кеңінен қолданылады. Болаттың құрамында шамамен 18% хром, 10% никель және титан бар, ол түйіршікаралық коррозияның алдын алатын тұрақтандырғыш элемент ретінде қолданылады. AISI 321 болатының созылу беріктігі 530–730 МПа, беріктігі 200–250 МПа, салыстырмалы созылуы 40–50%, қаттылығы ≈ 180 HV және 800 °C дейінгі температурада құрылымдық тұрақтылықты сақтайды [7]. Осы

қасиеттерінің арқасында AISI 321 болаты химия, мұнай және газ, тамақ және энергетика салаларында, әсіресе құбырларды, жылу алмастырғыштарды, реакторларды, қысыммен жұмыс істейтін ыдыстарды және турбина компоненттерін өндіру үшін кеңінен қолданылады. Жоғары беріктігіне қарамастан, тот баспайтын болаттар да үйкеліс, эрозия және экстремалды температура әсерінен зақымдалуы мүмкін. Мұндай зақымданумен күресу үшін квазикристалды Al-Cu-Fe негізіндегі жабындарды қолдану болаттардың қызмет ету мерзімін ұзартудың өте тиімді тәсілдерінің бірі. Бұл жабындар үйкелісті азайтып, тотығу мен тозудан қорғайды.

Бұл зерттеудің мақсаты HVOF әдісін қолдана отырып, AISI 321 болатына квазикристалды Al65Cu20Fe15 жабынын қондыру және оның трибологиялық қасиеттерін зерттеу болып табылады.

ЗЕРТТЕУ МАТЕРИАЛДАРЫ МЕН ӘДІСТЕРІ

Негіз ретінде AISI 321 аустениттік тот баспайтын болаты (15×45×3 мм³) пайдаланылды.

1-кесте. AISI 321 болатының химиялық құрамы

C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Ti	Fe
0,08	2,0	0,045	0,03	1,0	17,0–19,0	9,0–12,0	0,5	Rest

Алюминий (Al), мыс (Cu) және темір (Fe) ұнтақтарын Hebei Suoyi New Material Technology Co., Ltd. (Ханьдань, Қытай) компаниясы 99,5%-дан астам тазалықпен ұсынды. Бөлшектердің пішіні дұрыс емес, бұрышты және пластина тәрізді, бұл механикалық қорытпалау арқылы өндірілген материалдарға тән. Мұндай морфология әдетте сфералық ұнтақтармен салыстырғанда төмен ағындылыққа әкеледі, бірақ термиялық бүрку кезінде жабынның адгезиясына қолайлы үлкен беттік аумақты қамтамасыз етеді.

Талдау барысында бөлшектердің өлшемі 10-нан 80 микрометрге дейінгі кең диапазонды қамтитыны анықталды, атап айтқанда, 10-шы процентиль 18 мкм, медиана (50-ші процентиль) 40 мкм және 90-шы процентиль 75 мкм болды. Бұл бөлшектердің өлшемдік профилі HVOF технологиясында тегіс өңдеу және материалдың тұрақты берілуі үшін пайдалы [8-9]. Байқалған кубтық кристалдық құрылым, дифракция шыңдарындағы шағын ығысулармен қатар, синтезделген ұнтақтағы квазикристалды және кристалдық аймақтардың бар екенін көрсетеді. Бұл табиғи қаттылықтың, тотығуға төзімділіктің және төмен үйкелістің оңталы тепе-теңдігіне ықпал етеді, сондықтан, Al65Cu20Fe15 құрамы жоғары температура мен тозуға төтеп бере алатын жабындарды әзірлеу үшін жоғары әлеуетке ие [9].

Бұл зерттеу жұмысында HVOF бүрку кезінде оттегі қысымының әсері зерттелді. Себебі бұл параметр жабынның пайда болуы кезінде бөлшектердің

жылдамдығын, температураның таралуын және тотығу дәрежесін реттеуде маңызды рөл атқарады. Оттегі қысымы газ ағынының жылдамдығы мен турбуленттілігіне әсер етеді, бұл бөлшектердің қызу және балқу дәрежесін, олардың субстратпен соқтығысу кезіндегі кинетикалық энергиясын, сондай-ақ қалыптасқан жабынның сипаттамаларын – микроқұрылымын, тығыздығын және адгезия беріктігін анықтайды [10]. Оттегі қысымының әсерін жеке бағалау үшін процесстің барлық басқа параметрлері тұрақты деңгейінде сақталды: бүрку саптамасы мен субстрат арасындағы қашықтық 250 мм, пропан қысымы 1,9 бар және ауа қысымы 2,2 бар [11–12].

Бүрку параметрлері HVOF процесінің сипаттамаларына [25] және жоғары сапалы жабындарға қойылатын талаптарға негізделіп таңдалды, 250 мм қашықтық бөлшектердің температурасы мен соққы жылдамдығы арасындағы тепе-теңдікті қамтамасыз етті. Қызып кетудің алдын алды және квазикристалды құрылымды сақтады, ал 1,9 бар пропан қысымы бөлшектердің толық еруінсіз тұрақты жануды және біркелкі қызуды қамтамасыз етті. Осылайша, 3,0–3,5 бар оттегі қысымы бөлшектердің кинетикалық энергиясын, жабын тығыздығын және адгезиясын арттырды, ал 2,2 бар ауа қысымы отынның толық жануын және ұшу кезіндегі тотығуды азайтты (2-кесте). Нәтижесінде тұрақты жану, біркелкі бүрку үлгісі және біртекті жабынның қалыптасуы қамтамасыз етілді. Бөлшектер параметрлері мен бүрку арақашықтығының оңтайлылығы олардың жеткілікті дәрежеде қызуын және жоғары соққы энергиясын қамтамасыз етіп, құрылымы біркелкі қабаттың қалыптасуына ықпал етті.

2-кесте. HVOF параметрлері

Пропан қысымы, бар	Оттегі қысымы, бар	Ауа қысымы, бар	Арақашықтық, мм
1,9	3,0	2,2	250
1,9	3,5	2,2	250

Қолданылған жабындардың фазалық құрамы Ка сәулеленуін ($\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$) генерациялайтын мыс анодымен жабдықталған Panalytical X'Pert PRO дифрактометрін (Philips, Амстердам, Нидерланды) пайдаланып рентгендік дифракция (XRD) әдісімен талданды. Барлық өлшеулер бөлме температурасында (25°C), 40 кВ жұмыс кернеуінде және 30 мА ток күшімен жүргізілді. Дифракциялық үлгілер 2 θ диапазонында 20,01°-тан 89,99°-қа дейін, қадам өлшемі 0,02° және әр қадам үшін 2 с санау уақытымен жазылды. Фазаларды анықтау және талдау HighScore Plus бағдарламалық жасақтама пакетін пайдаланып жүргізілді.

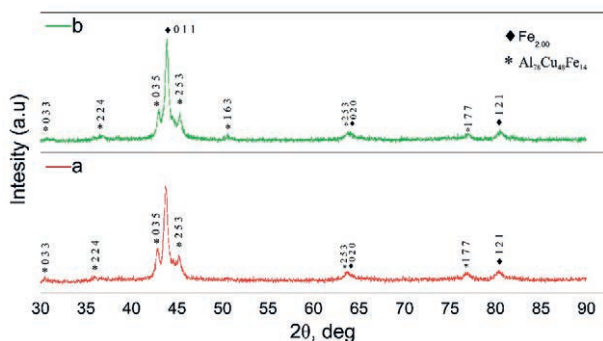
Жабындардың беттік морфологиясы мен элементтік құрамы Tescan Vega 4 микроскобын (Брно,

Чехия) пайдаланып сканерлеуші электронды микроскопия (SEM) арқылы зерттелді. Трибологиялық көрсеткіштер TRB3 трибометрінде (Антон Паар, Бухс, Швейцария) шар-диск конфигурациясында жүргізілген сырғанау тозу сынақтарын қолдану арқылы бағаланды. Сынақтар құрғақ сырғанау жағдайында қалыпты жүктеме 5 Н, сырғанау жылдамдығы 5 см/с және жалпы сырғанау ұзындығы 90 м болғанда жүргізілді. Қарсы шар ретінде диаметрі 6 мм болатын 100Cr6 болат шар пайдаланылды. Жабынның да, қарсы шардың да тозу жылдамдығы ASTM G99 стандартына сәйкес анықталды.

Нәтижелер және талқылау

Рентгендік дифракциялық талдау пропан, оттегі және ауаны қолдана отырып HVOF әдісімен алынған жабындарда $Al_{0.5}Fe_{1.5}$ және $Al_{1.8}Cu_{0.8}Fe_{1.4}$ фазаларының бар екенін анықтады. Рентгендік дифракциялық үлгілер (1-сурет) фазалық құрамның тұндыру жағдайларына тәуелділігін көрсетті: параметрлер өзгерген сайын $Al_{0.5}Fe_{1.5}$ шыңдарының қарқындылығы төмендеді, ал квазикристалды фазаның шыңдары артты. Квазикристалдар трансляциялық симметрияның және шексіз бірлік ұяшықтың болмауымен сипатталады, ал құрылымдық жағынан ұқсас жуықтау фазалары реттелген және онша күрделі емес деп саналады [14, 25].

$Al_{0.5}Fe_{1.5}$ металларалық қосылысы (~25 ат.% Al) ұяшық параметрі $a \approx 2,91$ Å болатын Im-3m кубтық құрылымда кристалданады [15]. DO_3 типті атомдық реттілік дәстүрлі Fe-Al қатты ерітінділерімен салыстырғанда қаттылық пен тұрақтылықты арттырады. Трибологиялық тұрғыдан алғанда, HVOF арқылы алынған $Al_{0.5}Fe_{1.5}$ негізіндегі жабындар болатта құрғақ сырғанау кезінде жоғары үйкеліс коэффициентін ($\mu \approx 0,6-0,7$) көрсетеді [16]. Бұл қосылыстың металдық сипатына және айқын жабысқақ өзара әрекеттесуіне байланысты. Тозу негізінен жабысқақ-абразивті сипатқа ие, микрожарықтардың пайда болуымен бірге жүреді. Жоғары қаттылығына қарамастан, материал орташа сынғыштықты көрсетеді, бұл жүктеме кезінде чиптердің пайда болуына ықпал етеді.



1-сурет. Рентгендік дифракциялық талдау нәтижесі

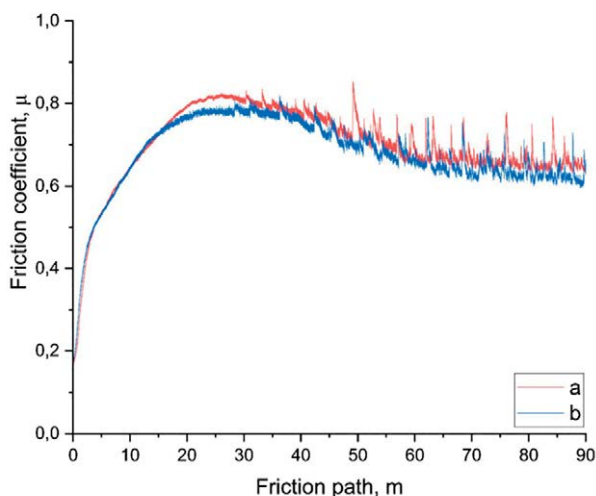
HVOF жабындарындағы квазикристалды құрылым квазикристалды ұнтақтан (балқыма тез салқындағаннан кейін) немесе субстраттағы бөлшектердің жоғары жылдамдықпен шашырауы және тез қатаюы кезінде қалыптасуы мүмкін. Al-Cu-Fe қорытпаларында ($Al_{62-63}Cu_{20-25}Fe_{12-15}$) негізгі фаза икосаэдрлік квазикристалды фаза болып табылады [17].

$Al_{78}Cu_{48}Fe_{14}$ фазасы ұяшық параметрі $a = 12,3120$ Å болатын кубтық құрылымға (Pm-3) ие және реттелген интерметалдық қосылыс ретінде жіктеледі, себебі олардың болуы тығыз орау және күшті интератомдық байланыстар арқылы қаттылық пен құрылымдық тұрақтылықты арттырады. Квазикристалды Al-Cu-Fe фазалары жоғары қаттылықпен сипатталады (~10 ГПа дейін, ~1000 HV) [18] және Al 6061-T6-мен салыстырғанда HVOF жабындарының микроқаттылығының 4-6 есе артуын қамтамасыз етеді [19]. Жабындардың қасиеттері фазалық құрамға және тұндыру жағдайларына айтарлықтай байланысты, бұл квазикристалды фазаның тұрақтылығына әсер етеді [20]. Температура жоғарылаған сайын квазикристалды фазадан жуық кристалды фазаға ауысу байқалады [21].

Ұнтақтың морфологиясы (бұрышты және пластина тәрізді) оның аққыштығын төмендетіп, біркелкі берілмеуіне және бөлшектердің агрегациялануына әкелуі мүмкін [22]. Сондай-ақ, меншікті бетінің ауданының ұлғаюы жоғары оттегі қысымы кезінде тотығуға бейімділікті арттырады. Ал бөлшектердің дұрыс емес пішіні жабынның жергілікті ақауларына (микрожарықтар, толық емес күйдіру) ықпал етеді. Осы зерттеуде HVOF әдісі пропан қысымы 1,9 бар, оттегі қысымы 3,0-3,5 бар, ауа қысымы 2,2 бар және бұрқу қашықтығы 250 мм болатын жағдайларда жүзеге асырылды. Бөлшектердің жалында болу уақыты қысқа болғандықтан, бұрыс пішінді бөлшектер толықтай қызып үлгермеуі мүмкін, бұл олардың соққы кезіндегі деформациялануын төмендетеді және жабын құрылымының біртекті болуына әкеледі [23-24].

2-суретте үйкеліс коэффициентінің сырғанау қашықтығына тәуелділігі көрсетілген. Қарсы бет ретінде стандартты тірек материалы болып табылатын 100Cr6 болаты пайдаланылды, бұл нәтижелердің практикалық маңыздылығын қамтамасыз етті. Оттегі қысымын 3,0-ден 3,5 барға дейін арттыру бөлшектердің толық қызуына ықпал етеді, олардың пластикалық деформациясын жақсартады және тығыздық және біркелкі жабын микроқұрылымын қалыптастырады. Трибологиялық сынақтар (5 Н, 5 см/с, 90 м) «В» үлгісінің (3,5 бар) тозуға төзімділігі ең жоғары екенін көрсетті: тозу ауданы $5764,3 \text{ мкм}^2$, тозу жылдамдығы $2,414 \times 10^{-4} \text{ мм}^3/\text{Н} \times \text{м}$ болды. «А» үлгісі үшін (3,0 бар) бұл мәндер сәйкесінше $11\,987,6 \text{ мкм}^3$ және $5,021 \times 10^{-4} \text{ мм}^3/\text{Н} \times \text{м}$ болды. Осылайша, 3,5

бар оттегі қысымы Al-Cu-Fe жабындарының оңтайлы трибологиялық сипаттамаларын қамтамасыз етеді.



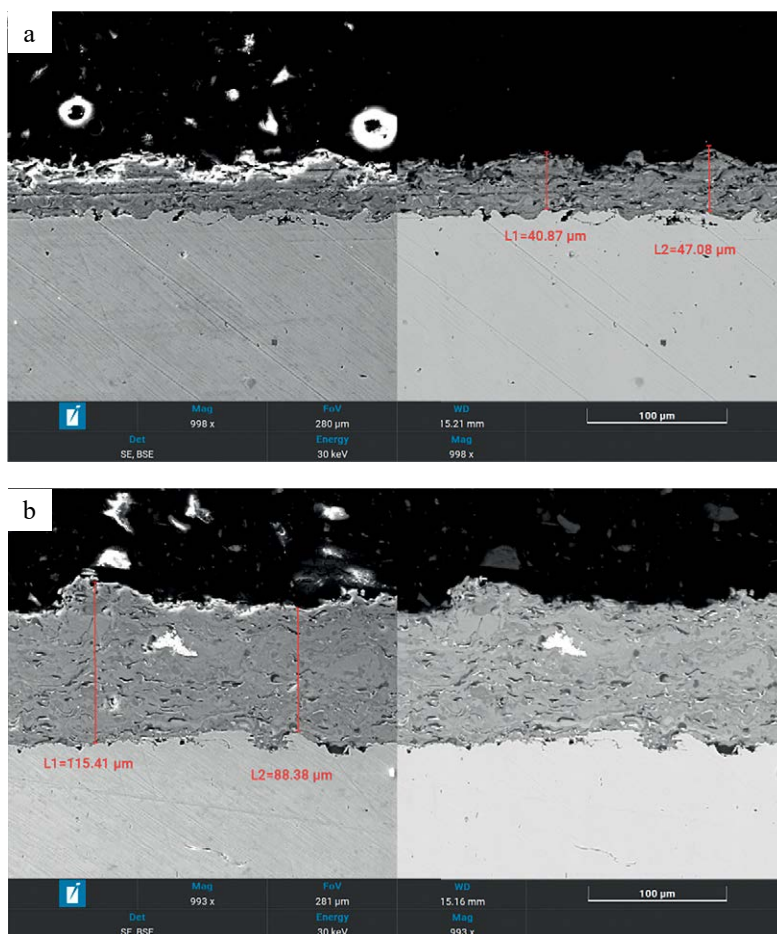
2-сурет. Үйкеліс коэффициентінің үйкеліс жолына тәуелділігінің графигі

Үйкеліс қисықтары (2-сурет) үлгілердің трибологиялық қасиеттеріндегі айырмашылықтарды көрсетеді: «А» үлгісі (оттегі қысымы 3,0 бар) тегіс

жұмыс фазасымен және $(0,70-0,72) \pm 0,02$ тұрақты күйдегі үйкеліс коэффициентімен сипатталады. Үйкелістің артуы металдық жанасу қабатын түзетін және 100Cr6 қарсы бетіне адгезияны күшейтетін интерметалдық Fe_2Al ($Fe_{1,5}Al_{0,5}$) фазасының басым болуына байланысты артып отырды.

«В» үлгісі (оттегі қысымы 3,5 бар) үйкеліс коэффициентінің тұрақты қисықпен $(0,55-0,60) \pm 0,05$ дейін төмендегенін көрсетеді. Төмен беттік энергия және квазикристалдардың шектеулі дислокациялық қозғалғыштығы адгезияның төмендеуіне және тұрақты сырғанау қабықшасының пайда болуына ықпал етеді [25]. Сонымен қатар, оңтайлы термиялық өңдеу жабын тығыздығын арттырады және тозуды тудыратын ақаулар санын азайтады.

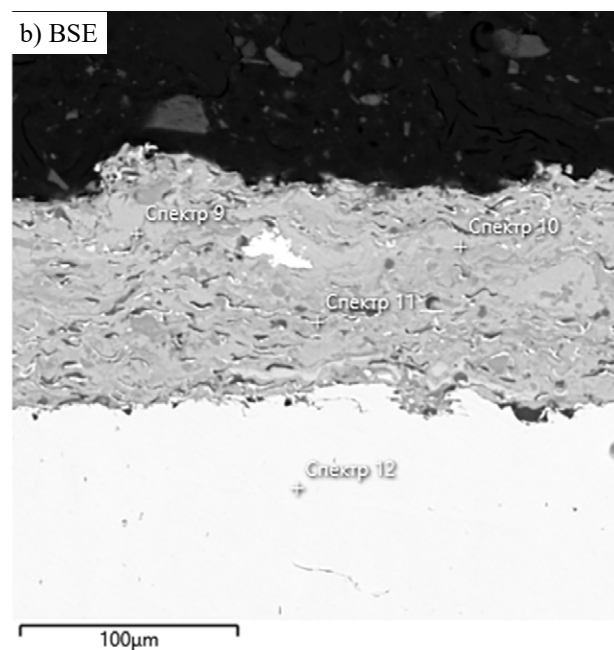
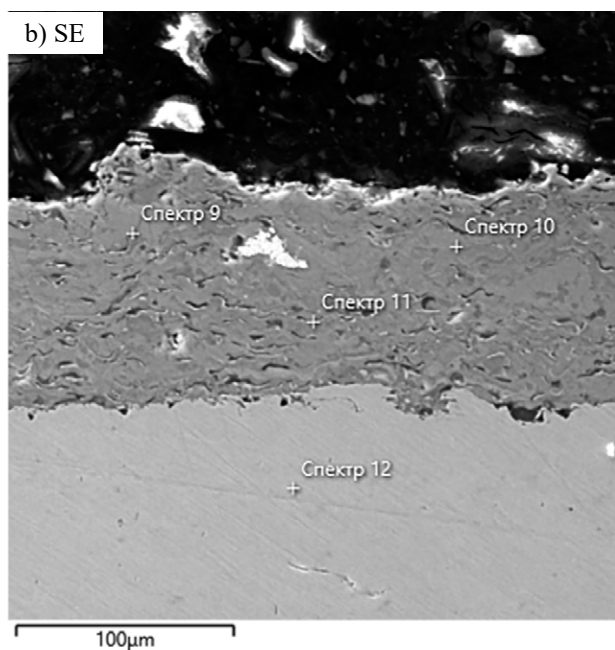
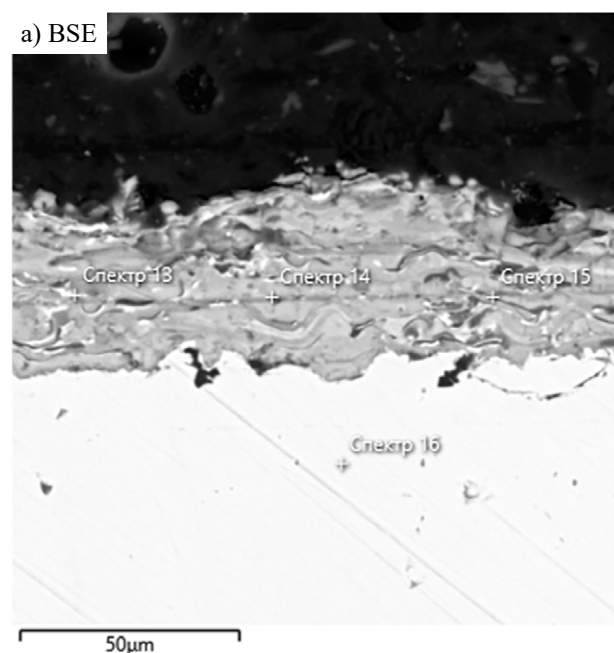
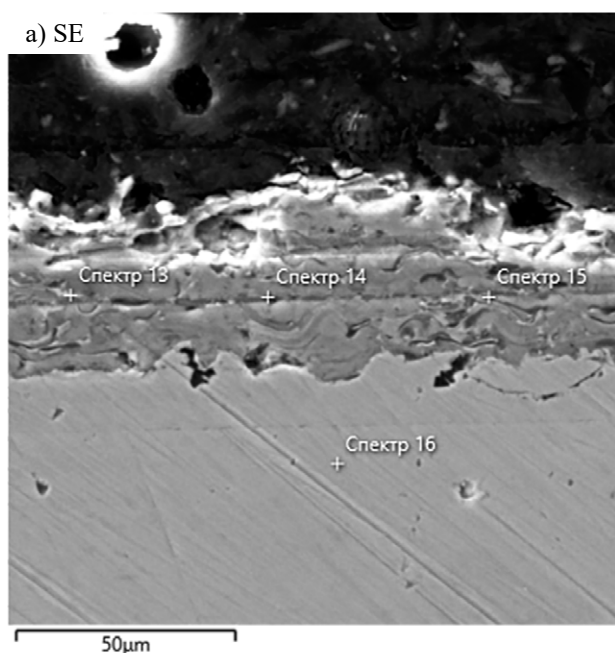
Жабын қалыңдығы 40,87-ден 115,41 мкм-ге дейін өзгеріп, «А» үлгісі үшін $43,97 \pm 3,0$ мкм және «В» үлгісі үшін $101,89 \pm 13,5$ мкм болды. Кері шекарада химиялық өзара әрекеттесудің немесе металлалық фазалардың пайда болуының белгілері анықталмады, бұл негізінен механикалық адгезияны көрсетеді. Бұл адгезия бүрку кезінде бөлшектердің жоғары кинетикалық энергиясына және құммен өңдеуден кейін негіз бетінің кедір-бұдырлығына байланысты (3-сурет).



3-сурет. Al-Cu-Fe жабын қалыңдығының микросуреттер. Үлгілер (a-b)

4-суретте екінші реттік электрондар (SE) және кері шашыраңқы электрондар (BSE) режимдерінде алынған, жергілікті және сызықтық ЭДС талдауы үшін

тандалған «А» және «В» үлгілерінің жабындарының сипаттамалық қималары көрсетілген (оттегі қысымы сәйкесінше 3,0 бар және 3,5 бар).



4-сурет. Оттегі режимдеріндегі SE және BSE кескіндері, үлгі: а) 3,0 бар б) 3,5 бар

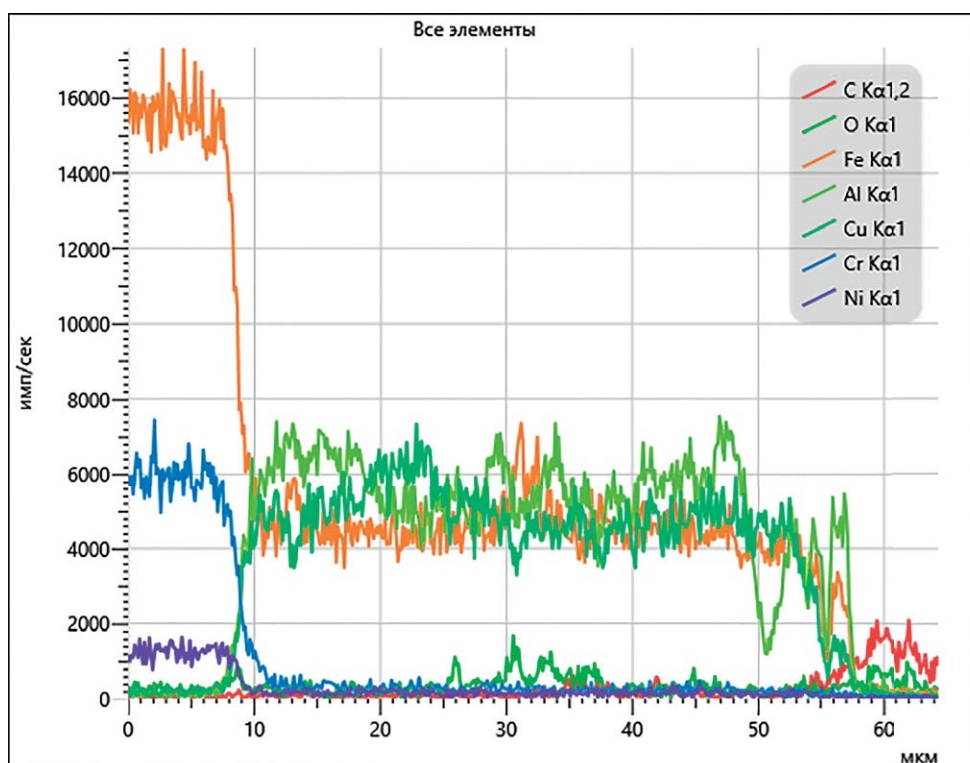
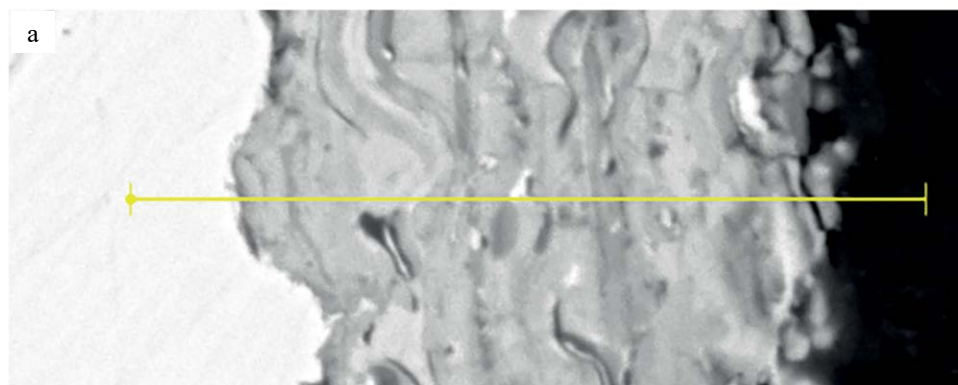
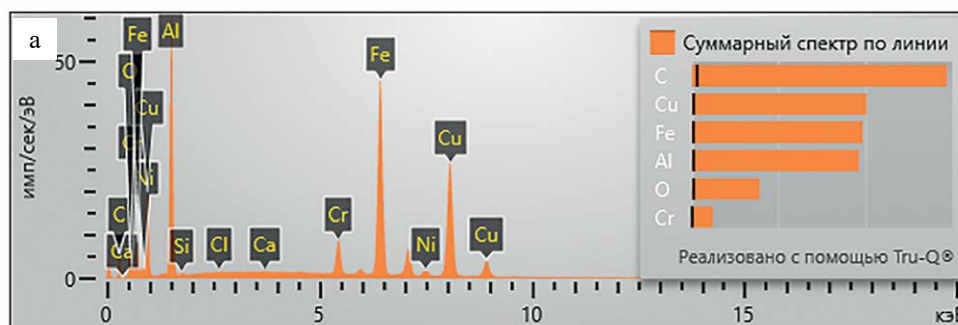
Жабындардың құрылымдық біртектілігін одан әрі бағалау үшін «А» (оттегі қысымы 3,0 бар) және «В» (оттегі қысымы 3,5 бар) үлгілерінің көлденең қимасында сызықтық EDS талдауы жүргізілді. Алынған элементтің таралу профилдері фазалардың түзілу ерекшеліктерін және AISI 321 субстратымен жанасудың сипатын көрсетеді (5-сурет).

Сызықтық сканерлеу негізгі шындықтардың Al ($K\alpha \approx 1,49$ кэВ), Fe ($K\alpha \approx 6,40$ кэВ) және Cu ($K\alpha \approx 8,04$ кэВ) сәйкес келетінін көрсетеді, бұл Al-Cu-Fe жүйесінің негізгі құрамын көрсетеді. Дегенмен, таралу профилдері, әсіресе Al және Cu үшін, қабат ішінде айқын платолар пайда болмай, айқын қарқындылық ауытқуларымен сипатталады. Бұл оттегі қысымының

AISI 321 БОЛАТ НЕГІЗДЕРІНДЕГІ Al65Cu20Fe15 ЖАБЫНДАРЫНЫҢ ТРИБОЛОГИЯЛЫҚ СИПАТТАМАЛАРЫНА HVOF ПРОЦЕСІ ПАРАМЕТРЛЕРІНІҢ ӘСЕРІ

төмендеуі кезінде бөлшектердің толық балкуымен байланысты микроқұрылымдық гетерогенділікті көрсетеді [26]. Интерфейс маңында Fe сигналының біртіндеп артуы байқалады, бұл субстраттың үлесіне де, Fe-Al интерметалл қосылыстарын қамтитын өтпелі аймақтың пайда болуына да байланысты бо-

луы мүмкін [27]. Оттегі сигналы ($O_2 K\alpha \approx 0,52$ кэВ) біркелкі тарамған, бұл ламеллааралық шекаралар бойында жергілікті оксид қосындыларының бар екенін көрсетеді [28]. Жалпы алғанда, профиль тығыздығы аз және ақаулы жабын құрылымын көрсетеді.

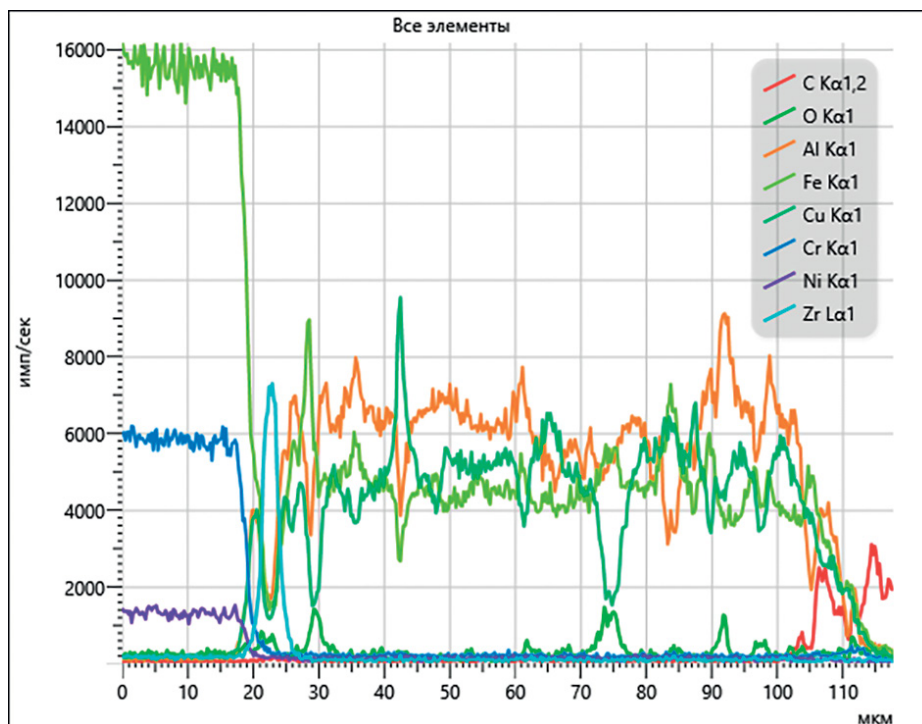
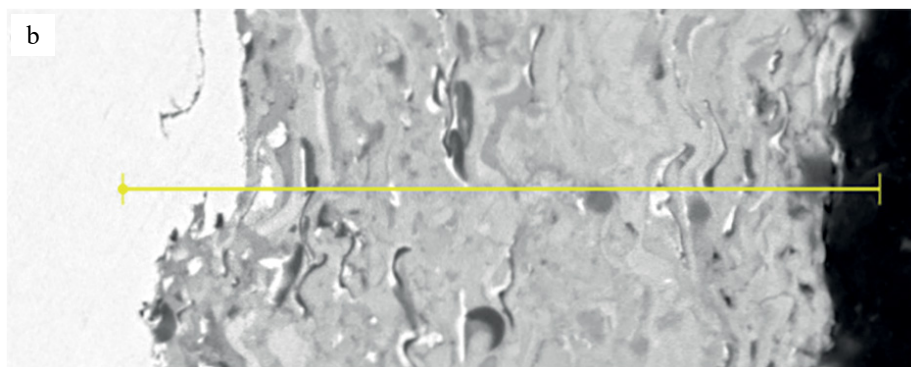
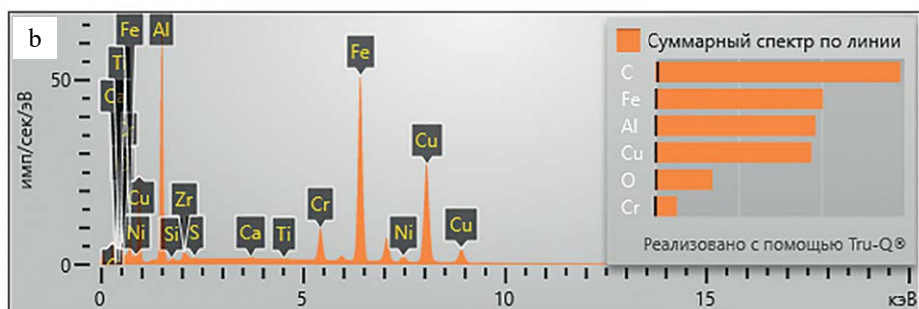


5-сурет. 3,0 бар оттегі қысымындағы «А» үлгісінің ЭДС талдауы

AISI 321 БОЛАТ НЕГІЗДЕРІНДЕГІ $Al65Cu20Fe15$ ЖАБЫНДАРЫНЫҢ ТРИБОЛОГИЯЛЫҚ СИПАТТАМАЛАРЫНА HVOF ПРОЦЕСІ ПАРАМЕТРЛЕРІНІҢ ӘСЕРІ

Бұл жағдайда Al, Cu және Fe таралу профильдері жабын ішіндегі айқын платоларды және субстрат шекарасында қарқындылықтың күрт төмендеуін көрсетеді, бұл қабаттың жоғары химиялық біртектілігін көрсетеді. Cu таралуы бүкіл қалыңдық бойынша біркелкі, бұл квазикристалды Al-Cu-Fe фазасының тұрақтылығын және сегрегацияның болмауын көрсетеді. Оттегі сигналы орташа және салыстырмалы түрде біркелкі, айқын жергілікті максимум-

дарсыз, оңтайлы термиялық жағдайларда шектеулі тотығуды растайды. Интерфейстің жанында AISI 321 болатына өтуден туындаған айқын Fe градиенті байқалады, жабынға терең диффузия белгілері жоқ. Бұл элементтің таралу үлгісі минималды кеуектілігі және тұрақты фазааралық шекарасы бар тығыз, құрылымдық тұрғыдан бүтін қабаттың пайда болуын көрсетеді (6-сурет).



6-сурет. 3,5 бар оттегі қысымындағы В үлгісінің ЭДС талдауы

Осылайша, сызықтық ЭДС талдауы оттегі қысымын 3,5 барға дейін арттыру 3,0 бармен салыстырғанда біртекті және химиялық тұрғыдан тұрақты микроқұрылымның пайда болуына ықпал ететінін растайды. Бұл «В» үлгісінің трибологиялық қасиеттерінің жақсаруымен өзара байланысты.

Қорытынды

Осылайша, HVOF әдісі AISI 321 болатының негізіне 3,0 бар оттегі қысымында қалыңдығы $43,97 \pm 3,0$ мкм және 3,5 барда қалыңдығы $101,89 \pm 13,5$ мкм болатын квазикристалды $Al_{65}Cu_{20}Fe_{15}$ жабындарын сәтті қалыптастырды. Жабынның пайда болуы негізінен айқын диффузиялық аймақ түзілмей, негізге механикалық адгезиямен қатар жүрді. Рентгендік дифракциялық талдау $Fe_{1.5}Al_{0.5}$ металлалық фазасының және Al-Cu-Fe жүйесінің квазикристалды фазасының бар екенін көрсетті. Оттегі қысымы 3,5 барға дейін артқан кезде квазикристалды компоненттің үлесінің артуы және Fe-Al фазалық шыңдарының салыстырмалы қарқындылығының төмендеуі байқалады. SEM және EDS зерттеулері 3,5 барда оксид қосындыларының минималды мөлшері бар тығыздық және химиялық тұрғыдан біртекті құрылым пайда болатынын, ал 3,0 барда микроқұрылымдық гетерогенділік пен жергілікті кеуектілік байқалатынын көрсетті. Трибологиялық сынақтар оттегі қысымын 3,0-ден 3,5 барға дейін арттыру үйкеліс коэффициентінің 0,70-0,72-ден 0,55-0,60-қа дейін төмендеуіне және тозу жылдамдығының екі еседен астам төмендеуіне әкелетінін көрсетті. Өнімділіктің жақсаруы квазикристалды фаза үлесінің артуымен және тұрақты трибопленканың пайда болуымен байланысты. Осылайша, 3,5 бар оттегі қысымы қарқынды үйкеліс және жоғары механикалық жүктемелер кезінде пайдалануға арналған тығыз және тозуға төзімді $Al_{65}Cu_{20}Fe_{15}$ жабындарын AISI 321 болатына қондыру үшін оңтайлы HVOF бүрку режимі болып табылады.

***Алғыс білдіру.** Бұл зерттеуді Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті қаржыландырды (грант № AP26103943).*

Пайдаланылған әдебиет тізімі / REFERENCES:

1. Zhu L., Soto-Medina S., Cuadrado-Castillo W., Hennig R. G., Manuel M. V. New experimental studies on the phase diagram of the Al-Cu-Fe quasicrystal-forming system // *Materials & Design*. – 2020. – Vol. 185. – P. 108186. – <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108186>.
2. Wolf W., Koga G. Y., Schulz R., Savoie S., Kiminami C. S., Bolfarini C., Botta W. J. Wear and corrosion performance of Al-Cu-Fe-(Cr) quasicrystalline coatings produced by HVOF // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2020. – Vol. 29. – P. 1195-1207. – <https://doi.org/10.1007/s11666-020-01053-2>.
3. Рахадиллов Б.К., Курбанбеков Ш.Р., Сейтов Б., Муктанова Н., Балтабаева Д.Э., Катпаева К. [Rahadilov B. K., Kurbanbekov Sh. R., Seytov B., Muktanova N., Baltabayeva D. E., Katpayeva K.] Теоретические исследования и решения оптимальных режимов процесса термического напыления HVOF для покрытия Cr_3C_2 -NiCr [Spraying process for Cr_3C_2 -NiCr coating (in Russian)] // *Вестник НЯЦ РК [NNC RK bulletin]*. – 2023. – No. 4. – S. 22-31. – <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2023-4-22-31>
4. Рахадиллов Б. К., Муктанова Н., Какимжанов Д. Н. [Rahadilov B. K., Muktanova N., Kakimzhanov D. N.] Влияние варьирования расстояния напыления на структурно-фазовое состояние и механо-трибологические свойства покрытий на основе 86WC-10CO-4CR, полученных методом HVOF [Influence of varying the spraying distance on the structural-phase state and mechanotribological properties of 86WC-10Co-4Cr-based coatings obtained by the HVOF method (in Russian)] // *Вестник НЯЦ РК [NNC RK bulletin]*. – 2024. – No. 3. – S. 91-104. – <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2024-3-91-104>
5. Пантелеенко Ф. И., Жэн П. [Panteleenko F. I., Zhen P.] Прогрессивные технологии лазерной наплавки и газотермического напыления [Progressive technologies of laser surfacing and gas-thermal spraying (in Russian)] // *лите и металлургия [Foundry Production and Metallurgy]*. – 2024. – No. 3. – S. 61-65. – <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-3-61-65>
6. Dubois J. M., Belin-Ferré E. Friction and solid-solid adhesion on complex metallic alloys // *Science and Technology of Advanced Materials*. – 2014. – Vol. 15. – P. 034804. – <https://doi.org/10.1088/1468-6996/15/3/034804>.
7. 08X18H10T – сталь коррозионно-стойкая жаропрочная [08Kh18N10T – stal' korrozionno-stoykaya zharoprochnaya (in Russian)] // *Марочник стали и сплавов [Marochnik stali i splavov]*. – [Б. г. (B. g.)].
8. Kumar R., Sharma S., Singh J. P. et al. Enhancement in wear-resistance of 30MnCRB5 boron steel substrate using HVOF thermal sprayed WC-10%Co-4%Cr coatings // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2023. – Vol. 27. – P. 1072-1096.
9. Mishra B. B., Nautiyal H. Frictional and wear behavior of Cr_3C_2 -NiCr coating on AISI-304 stainless steel // *Advances in Materials and Processing Technologies*. – 2022. – Vol. 8, No. 4. – P. 4007-4017. – <https://doi.org/10.1080/2374068X.2022.2036508>.
10. Mora J., García P., Muelas R., Agüero A. Hard quasicrystalline coatings deposited by HVOF thermal spray to reduce ice accretion in aero-structures components // *Coatings*. – 2020. – Vol. 10, No. 3. – P. 290. – <https://doi.org/10.3390/coatings10030290>.
11. Shalaeva E. V., Selyanin I. O., Smirnova E. O., Smirnov S. V., Novacheck D. D. Deformation behavior and structure of the i-Al-Cu-Fe quasicrystalline alloy in the vicinity of a nanoindenter imprint // *Physics of the Solid State*. – 2018. – Vol. 60, No. 2. – P. 307-314. – <https://doi.org/10.1134/S1063783418020233>.
12. Huttunen-Saarivirta E., Turunen E., Kallio M. Microstructural characterisation of thermally sprayed quasicrystalline

- Al-Co-Fe-Cr coatings // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2003. – Vol. 354. – P. 269-280. – [https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(03\)00274-3](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(03)00274-3).
13. Wolf W., Koga G. Y., Schulz R. et al. Wear and corrosion performance of Al-Cu-Fe-(Cr) quasicrystalline coatings produced by HVOF // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2020. – Vol. 29. – P. 1195-1207. – <https://doi.org/10.1007/s11666-020-01053-2>.
14. Murray C. ASTM G99 tip's perspective continuous wear contact // *Today's Standards Tomorrow's Materials*. – 2013. – Vol. 9.
15. Erkisi A., Surucu G. The investigation DO3-type Fe₃M (M = Al, Ga, Si and Ge) full-Heusler alloys within first principles study // *Politeknik Dergisi*. – 2018. – Vol. 21, No. 4. – P. 927-936.
16. Pougoum F., Martinu L., Klemberg-Sapicha J. E., Savoie S., Schulz R. Wear properties of Fe₃Al-based HVOF coatings strengthened with in-situ precipitated nitride and boride particles // *Surface and Coatings Technology*. – 2016. – Vol. 307. – P. 109-117.
17. Wolf W., Koga G. Y., Schulz R., Savoie S., Kiminami C. S., Bolfarini C., Botta W. J. Wear and corrosion performance of Al-Cu-Fe-(Cr) quasicrystalline coatings produced by HVOF // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2020. – Vol. 29. – P. 1195-1207.
18. Babilas R., Bajorek A., Spilka M., Radoń A., Łoński W. Structure and corrosion resistance of Al-Cu-Fe alloys // *Progress in Natural Science: Materials International*. – 2020. – Vol. 30, No. 3. – P. 393-401.
19. Mora J., García P., Muelas R., Agüero A. Hard quasicrystalline coatings deposited by HVOF thermal spray to reduce ice accretion in aero-structures components // *Coatings*. – 2020. – Vol. 10. – P. 1-22.
20. Борисова А. Л., Борисов Ю. С., Астахов Е. А. и др. [Borisova A. L., Borisov Yu. S., Astakhov E. A. i dr.] Теплозащитные свойства газотермических покрытий, содержащих квазикристаллический сплав системы Al-Cu-Fe [Теплозащитные свойства газотермических покрытий, содержащих квазикристаллический сплав системы Al-Cu-Fe (in Russian)] // *Автоматическая сварка [Avtomaticeskaya svarka]*. – 2012. – № 4 (708). – С. 36-41.
21. Шалаева Е. В., Прекуль А. Ф. [Shalayeva E. V., Prekul' A. F.] Структурно-фазовые превращения в квазикристаллообразующих сплавах Al-Cu-Fe и дефекты икосаэдрической фазы [Strukturno-fazovyye prevrashcheniya v kvazikristalloobrazuyushchikh splavakh Al-Cu-Fe i defekty ikosaedricheskoй fazy (in Russian)] // *Физика металлов и металловедение [Fizika metallov i metallovedeniye]*. – 2010. – Т. 109, № 4. – С. 424-433.
22. Dubois J. M., Belin-Ferré E. Friction and solid-solid adhesion on complex metallic alloys // *Science and Technology of Advanced Materials*. – 2014. – Vol. 15. – P. 034804. – <https://doi.org/10.1088/1468-6996/15/3/034804>.
23. Fleury E., Kim Y. C., Kim J. S. et al. Sliding friction and wear behavior of Al-Ni-Co-Si quasicrystalline coatings deposited by the high-velocity oxy-fuel spraying technique // *Journal of Materials Research*. – 2002. – Vol. 17. – P. 492-501.
24. Suárez M. A., Esquivel R., Alcántara J., Dorantes H., Chávez J. F. Effect of chemical composition on the microstructure and hardness of Al-Cu-Fe alloy // *Materials Characterization*. – 2011. – Vol. 62, No. 9. – P. 917-923.
25. Kurbanbekov S., Gaipov T., Saidakhmetov P. et al. Microstructure, phase components, and tribological properties of Al₆₅Cu₂₀Fe₁₅ quasicrystal coatings deposited by HVOF // *Lubricants*. – 2025. – Vol. 13, No. 7. – P. 297.
26. Li L., Bi Q., Yang J. et al. Large-scale synthesis of Al-Cu-Fe submicron quasicrystals // *Scripta Materialia*. – 2008. – Vol. 59, No. 6. – P. 587-590.
27. Suárez M. A., Esquivel R., Alcántara J., Dorantes H., Chávez J. F. Effect of chemical composition on the microstructure and hardness of Al-Cu-Fe alloy // *Materials Characterization*. – 2011. – Vol. 62, No. 9. – P. 917-923.
28. Huttunen-Saarivirta E., Turunen E., Kallio M. Influence of Cr alloying on the microstructure of thermally sprayed quasicrystalline Al-Cu-Fe coatings // *Intermetallics*. – 2003. – Vol. 11, No. 9. – P. 879-891.

**ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА HVOF НА ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ПОКРЫТИЙ Al65Cu20Fe15 НА ПОДЛОЖКЕ ИЗ СТАЛИ AISI 321**

Д.Э. Балтабаева^{1*}, Ш. Курбанбеков², Л. Баятанова¹, А. Coruh³, Ю.Амангельдиева¹

¹*Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан*

²*Международный казахско-турецкий университет имени Ходжи Ахмеда Ясави, Туркестан, Казахстан*

³*Университет Сакаръя, Турция*

* E-mail для контактов: dilnoza.baltabayeva@ayu.edu.kz

В настоящем исследовании систематически изучается влияние параметров высокоскоростного кислородно-топливного напыления (HVOF), с особым акцентом на давление кислорода, на микроструктуру и трибологические характеристики покрытий Al65Cu20Fe15. Покрытия наносились при двух значениях давления кислорода (3,0 и 3,5 бар), при этом остальные параметры процесса напыления оставались неизменными. Микроструктурная характеристика проводилась с использованием сканирующей электронной микроскопии (SEM) и энергодисперсионной спектроскопии (EDS), а фазовый состав анализировался для оценки доли квазикристаллических и кристаллических фаз. Трибологическое поведение оценивалось методом испытаний по схеме «шар-диск» (ball-on-disk) при скользящем трении с непрерывной регистрацией коэффициента трения. Результаты показывают, что давление кислорода сильно влияет на плотность покрытия, фазовый состав и образование трибопленок. Покрытие, нанесенное методом напыления при давлении кислорода 3,5 бар, продемонстрировало наиболее сбалансированные характеристики со стабильным коэффициентом трения 0,55–0,60 и постоянным износом, что объясняется более высокой долей квазикристаллической фазы и однородной трибопленкой. Таким образом, по результатам проведенного анализа установлено, что обработка образцов при давлении кислорода 3,5 бар является оптимальным технологическим режимом, обеспечивающим формирование более плотной микроструктуры и улучшенные трибологические характеристики покрытия.

Ключевые слова: квазикристаллы, Al-Cu-Fe, HVOF, AISI 321, трибология, XRD, СЭМ, коэффициент трения, сталь, EDS.

**INFLUENCE OF HVOF PROCESS PARAMETERS ON THE TRIBOLOGICAL CHARACTERISTICS OF
Al65Cu20Fe15 COATINGS ON AISI 321 STEEL SUBSTRATE**

D.E. Baltabayeva^{1*}, Sh. Kurbanbekov², L. Bayatanova¹, A. Coruh³, Y. Amangeldiyeva¹

¹*D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan*

²*Khoja Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University, Turkistan, Kazakhstan*

³*Sakarya University, Türkiye*

* E-mail for contacts: dilnoza.baltabayeva@ayu.edu.kz

This study systematically examines the influence of high-velocity oxygen-fuel (HVOF) spraying parameters, with particular emphasis on oxygen pressure, on the microstructure and tribological performance of Al65Cu20Fe15 coatings. The coatings were deposited at two oxygen pressures (3.0 and 3.5 bar), while all other spraying parameters remained constant. Microstructural characterization was performed using scanning electron microscopy (SEM) and energy-dispersive spectroscopy (EDS), and phase composition was analyzed to assess the proportion of quasi-crystalline and crystalline phases. Tribological behavior was assessed using a ball-on-disk sliding test with continuous friction coefficient recording. The results show that oxygen pressure significantly influences coating density, phase composition, and tribofilm formation. The coating deposited by spraying at an oxygen pressure of 3.5 bar demonstrated the most balanced characteristics, with a stable friction coefficient of 0.55–0.60 and consistent wear, which is explained by a higher proportion of the quasi-crystalline phase and a homogeneous tribofilm. Thus, the analysis revealed that processing the samples at 3.5 bar oxygen pressure is the optimal process mode, ensuring the formation of a denser microstructure and improved tribological properties of the coating.

Keywords: quasicrystals, Al-Cu-Fe, HVOF, AISI 321, tribology, XRD, SEM, friction coefficient, steel, EDS.