

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2025-2-142-150>

УДК 621.793.71

HVOF ӘДІСІМЕН АЛЫНҒАН $Al_{65}Cu_{20}Fe_{15}$ КВАЗИКРИСТАЛДЫ ЖАБЫНДАРЫНЫҢ ТРИБОЛОГИЯЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІН ЗЕРТТЕУ

Ш. Р. Курбанбеков, А. Н. Әбдімүтәліп*, Д. Э. Балтабаева

Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті, Түркістан, Қазақстан

* Байланыс үшін E-mail: aray.abdimutalip@bk.ru

Бұл жұмыста жоғары жылдамдықты оттекті отынмен бүрку HVOF әдісімен У8Г құралдық болатына алынған $Al_{65}Cu_{20}Fe_{15}$ квазикристалды жабындарының трибологиялық қасиеттері мен микроқаттылығы зерттелді. Ауа беру режимінің (1,9 бар; 2,1 бар; 2,3 бар) жабындардың тозуға төзімділігіне әсері ерекше назарға алынды. Зерттеу «шар-диск» әдісімен жүргізіліп, микроструктурасы сканерлейтін электронды микроскоп көмегімен талданды. Пропан – 2 бар, оттегі – 2,1 бар, ауа – 2,1 бар режимінде алынған үлгі ең төменгі тозу ізінің енін (902 мкм) және тұрақты үйкеліс коэффициентін көрсетті, бұл оның тозуға төзімділігін дәлелдейді. Виккерс әдісімен өлшенген жабынның микроқаттылығы 800 HV құрап, оның жоғары беріктігін көрсетеді. Бұл нәтижелер квазикристалды жабындардың авиация, автомобиль және машина жасау өнеркәсібіндегі жоғары тозуға төзімді ортада қолданылу мүмкіндігін айқындайды.

Түйін сөздер: HVOF, $Al_{65}Cu_{20}Fe_{15}$, У8Г, морфология, микроқаттылық, үйкеліс коэффициенті индустрияландыру, инновациялар және инфрақұрылым.

КІРІСПЕ

Өнеркәсіптің көптеген салаларында болаттан жасалған материалдар жоғары жүктемелер және температура әсерінен тозуға, жоғары үйкеліске және коррозияға ұшырайды. Бұл материалдардың беттік қабаттарын қорғау мақсатында қаттылығы мен тозуға төзімділігі жоғары WC-Co және Cr_3C_2 -NiCr сияқты керамика-металл композиттік жабындар кеңінен қолданылады [1–6]. Алайда бұл жабындардың бірнеше шектеулері бар: олар морт сынғыш келеді, термиялық тұрақтылығы шектеулі және вольфрам мен кобальттың құны жоғары болуына байланысты өнеркәсіпте кең ауқымды қолданылуын тежейді [7, 8]. Жоғары жүктеме мен температурада ұзақ жұмыс жасайтын квазикристалды жабындар материалдардың жарамдылық мерзімін арттырудың оңтайлы шешімі болып табылады [9].

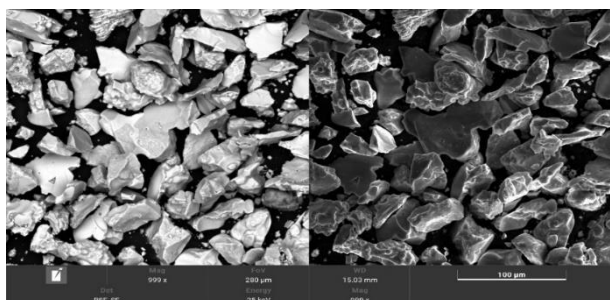
Квазикристалды жабындар кристалдық торлардың дәстүрлі заңдылықтарына бағынбайтын периодты емес атомдық құрылымымен ерекшеленеді және икосаэдрлік симметриясы арқасында жоғары беріктік, төмен жылу өткізгіштік пен тотығуға төзімділікті қамтамасыз етеді [10]. Мұндай жабындар төмен үйкеліс коэффициенті [11], жоғары тозуға төзімділік [12] қасиеттері мен механикалық жүктемелерге төзімді болғаны үшін экстремалды жағдайларда жұмыс істейтін үйкеліс түйіндерінде тиімді қолдануға мүмкіндік береді. Әсіресе, $Al_{65}Cu_{20}Fe_{15}$ негізіндегі икосаэдрлік квазикристалды жабындар жоғары температурада да өз қасиеттерін сақтай отырып, жоғары қаттылық, ыстыққа төзімділік және коррозияға қарсы тұрақтылық көрсетеді [13–15]. Квазикристалдардың бұл ерекше құрылымы оларға энергия шығынын азайтатын және жұмыс беттерінің тозуын баяулатын төмен үйкеліс коэффициентін береді, сондай-ақ агрессивті ортада пайдалануға мүмкіндік беретін

жоғары коррозиялық төзімділікке ие етеді [16–20]. Осы қасиеттердің жиынтығы олардың тозуға төзімділігін арттырып, қымбат материалдарды алмастыруға жол ашады [21, 22]. Сондықтан квазикристалды жабындар авиацияда, автомобиль және машина жасау салаларында балама қорғаныс қабаты ретінде табысты қолданылып, бөлшектердің тиімділігі мен қызмет ету мерзімін айтарлықтай арттырады [23].

Жабындарды алу үшін әртүрлі тәсілдер қолданылады, физикалық және химиялық әдістер солардың ішінде ең кең таралғаны болып келеді. Физикалық әдістерге жоғары жылдамдықты газды жалынмен бүрку (HVOF), вакуумдық буландыру (PVD), плазмалық шашырау, газ-динамикалық бүрку [24], плазмалық бүрку, жоғары энергиялы термиялық бүрку [25] және магнетрондық тозандату жатады. Бұл әдістер тығыз және жоғары адгезиялы жабындар алуға мүмкіндік береді. Әсіресе, магнетрондық тозандату жұқа, біртекті және сапалы жабындар алу үшін жиі қолданылады. Бүгінгі таңда ең перспективалы, нанокұрылымды жабындар алуға мүмкіндік беретін әдістердің бірі – HVOF [26–29]. Нәтижесінде, кеуектілігі төмен, субстратқа жоғары адгезиялы тығыз және берік жабын түзіледі [30–32]. HVOF әдісі $Al_{65}Cu_{20}Fe_{15}$ негізіндегі квазикристалды жабындарды бүрку үшін ерекше қолайлы, өйткені ол олардың бірегей құрылымын сақтай отырып, жоғары қаттылықты, төмен үйкеліс коэффициентін және тамаша тозуға төзімділікті қамтамасыз етеді [33–37]. Бөлшектердің жоғары кинетикалық энергиясы шаңды қабаттардың механикалық қасиеттерін жақсартады, бұл әдісті берік және төзімді квазикристалды жабындарды жасау үшін ең тиімді тәсілдердің бірі етеді [38–41].

ЗЕРТТЕУ ӘДІСТЕРІ

Зерттеулер У8Г құралдық көміртекті болатынын сыртқы бетіне алынған жабын үлгілерінде жүргізілді. Бұл болат ГОСТ 1435-99 стандартына сәйкес келеді, қалыңдығы 5–10 мм, ал ені мен ұзындығы 20×20 мм. HVOF әдісімен (Ресей Федерациясы, Санкт-Петербург қаласы) Термика-3 қондырғысының жабдықтарын пайдалана отырып алынды. $\text{Al}_{65}\text{Cu}_{20}\text{Fe}_{15}$ квазикристалды материалы ұсақ дисперсті ұнтаққа дейін майдаланып, қыздырылып, негізге бағытталады, соның нәтижесінде жабын түзіледі. Алынған ұнтақтардың дисперстілігі 25–40 мкм құрады, бұл олардың тиімді шашырауын қамтамасыз етеді (сурет 1).



1-сурет. $\text{Al}_{65}\text{Cu}_{20}\text{Fe}_{15}$ ұнтағының СЭМ суреттері

$\text{Al}_{65}\text{Cu}_{20}\text{Fe}_{15}$ құрамындағы квазикристалды ұнтақтар У8Г болат негізіне HVOF әдісімен келесі параметрлер бойынша жабын ретінде алынды: бүрку жылдамдығы 700 м/с-қа дейін, газ ағынының температурасы 3000 °С -қа дейін жетті. Шашқыш саптама мен негіз арасындағы қашықтық 350 мм деңгейінде орнатылды, бұл бөлшектердің ағын ішінде тұрып қалуын болдырмай, оларды жеткілікті түрде қыздырып, жылдамдатуға мүмкіндік берді. Бөлшектердің оңтайлы өлшемі мен қашықтықтың дұрыс таңдалуы нәтижесінде ұнтақтың газ ағынында болу уақыты жеткілікті болып, оның толық қызуына және қажетті энергиямен негізге жетуіне жағдай жасалды. Бұл жабынның жоғары адгезиясы мен біркелкілігін қамтамасыз етті. Материалдың квазикристалды құрылымын сақтау температура мен жылдамдықты қатаң бақылау арқылы жүзеге асырылды, бұл ұнтақтың шамадан тыс қызуын және оның бірегей қасиеттерінің бұзылуын болдырмауға мүмкіндік берді.

Кесте 1. HVOF әдісімен қапталған квазикристалдық жабындардың параметрлері

Үлгі	Қашықтық, мм	Газ (пропан), бар	Ауа, бар	Оттегі, бар
Үлгі а	350	2	1,9	2,1
Үлгі б	350	2	2,1	2,1
Үлгі с	350	2	2,3	2,1

Үлгіні жоғары дәлдікпен зерттеу және оның бетінің егжей-тегжейлі кескіндерін алу үшін термоэмиссиялық вольфрам катоды бар Tescan Vega (Брно, Чехия) сканерлеуші электронды микроскопы (СЭМ)

қолданылды. Бұл әдістің басты артықшылықтарының бірі-жабын адгезиясын зерттеу және ақауларды анықтау мүмкіндігі. $\text{Al}_{65}\text{Cu}_{20}\text{Fe}_{15}$ ұнтағының химиялық құрамын анықтау үшін СЭМ-нің жұмыс қашықтығы 10–15 мм болып орнатылды, үдеткіш кернеу 25 кВ-қа дейін көтерілді, ажыратымдылығы 275 нм болды. Үлгі құрамындағы элементтер мен олардың концентрациясын анықтау үшін EDS қосылды. Материал құрамындағы айырмашылықтарды визуализациялау үшін кері шашыранды электрондар детекторы (BSE) қолданылды, ал беткі құрылымды жоғары сапалы кескінмен көрсету үшін екіншілік электрондар детекторы (SE) пайдаланылды. Үлкейтудің ең жоғары деңгейі 1000×, ену тереңдігі 0,5–3 мкм болды. Сондай-ақ, алынған СЭМ кескіндері рентгендік дифракция (X-ray) мәліметтерімен біріктірілді.

Тозуға төзімділікті, үйкеліс коэффициентін және материалдардың ұзақ мерзімділігін бағалау үшін трибологиялық зерттеулер Tribometer TRB3 (Anton-Paar, Buchs, Switzerland) құрылғысында жүргізілді. Үйкеліс коэффициентін анықтау үшін диаметрі 3 мм шар тәрізді сынама үлгіге басылды. Үйкеліс ізінің диаметрі 90 мкм, жүктеме 5 Н, радиусы 3 мм, ұстап тұру уақыты 30 минут болды. Сызықтық жылдамдық 5 см/сек, қозғалтқыш жылдамдығы 159,1549 айн/мин. Трибологиялық қасиеттердің нәтижелері Origin бағдарламасында өңделді.

Квазикристалды жабындардың қаттылығын зерттеу Виккерс микроқаттылығын өлшеу әдісі бойынша жүргізілді. Виккерс әдісі материалдардың қаттылығын жоғары дәлдікпен анықтауға мүмкіндік беретін сенімді тәсілдердің бірі. Сынау кезінде үлгі бетіне алмаз пирамидалы индентор белгілі бір күшпен басылады, содан кейін пайда болған іздің диагональдары өлшеніп, микроқаттылық мәні есептеледі.

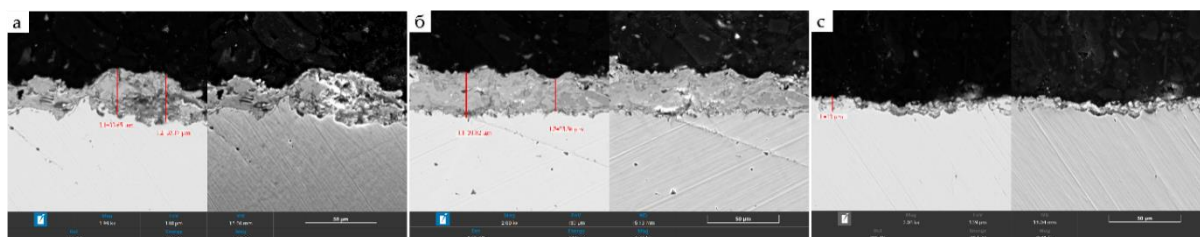
HVOF әдісімен алынған $\text{Al}_{65}\text{Cu}_{20}\text{Fe}_{15}$ негізіндегі квазикристалды жабындардың микроқаттылығы сенсорлық экраны бар HLV-1DT Виккерс микроқаттылық өлшегіші (Shanghai Hualong Test Instruments Corporation, Шанхай, Қытай) арқылы зерттелді. Сынақ жүктемесі 0,2 Н, ал ұстап тұру уақыты 10 секунд болды. Өлшеу нәтижесінде алынған микроқаттылық мәндері 730–800 HV аралығында өзгерді. Бұл зерттеу алынған жабындардың механикалық қасиеттерін тереңірек талдауға және олардың жұмыс қабілеттілігін бағалауға мүмкіндік береді. Жоғары микроқаттылық мәндері квазикристалды жабындардың қаттылығы мен беріктігінің жоғары екенін көрсетеді, бұл олардың тозуға төзімділігі мен ұзақ мерзімді қызмет етуіне оң әсер етеді. Сонымен қатар, HVOF әдісімен алынған жабындардың құрылымдық тұрақтылығы мен беріктігі олардың өнеркәсіптік қолданысқа кеңінен енгізілуінің әлеуеті жоғары екенін дәлелдейді.

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ТАЛҚЫЛАУ

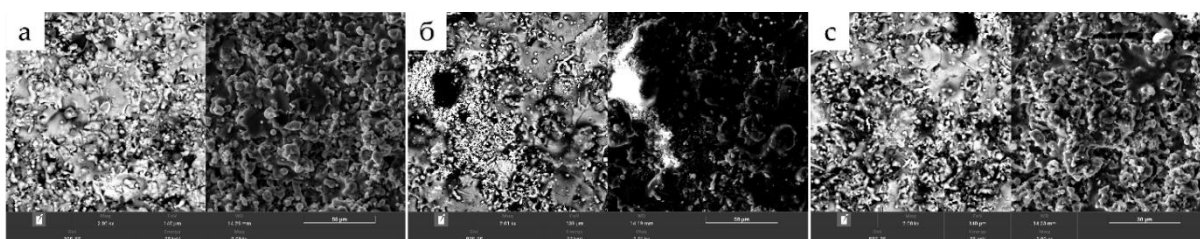
Жүргізілген зерттеулер нәтижесінде $Al-Cu-Fe$ жабындардың физика-механикалық жақсаруы анықталды. Сондай-ақ, көрсетілген бүрку режимдерін қолдану тығыз және біртекті жабынның қалыптасуына ықпал ететіні белгілі болды. Бұдан бөлек, жабын мен болат арасындағы қабаттардың ажырауы тіркелмеді, бұл материалдың жақсы адгезиялық қасиеттерін көрсетеді. 2-суретте $Al_{65}Cu_{20}Fe_{15}$ негізіндегі квазикристалды жабынмен қапталған үлгінің электронды-микроскопиялық суреті көрсетілген. Алынған жабындардың қалыңдығы бүрку режимдеріне байланысты 13-тен 34 мкм-ге дейін болды (2 сурет).

Трибологиялық сынақтарға дейін жабындардың беткі морфологиясы сканерлеуші электронды микроскопия әдісімен зерттеліп, олардың құрылымдық ерекшеліктері 3-суретте көрсетілгендей сипатталды. За суреттен бетінің салыстырмалы түрде біркелкі, бірақ айқын түйіршікті құрылымға ие екенін көруге болады. Сонымен қатар, ұсақ кеуектер мен қараңғылау аймақтар байқалады, бұл тығыздықтың өзгеруін көрсетуі мүмкін. 3б сурет біркелкірек микроструктураны көрсетеді, бұл да жоғары тығыздықты білдіруі мүмкін, сондай-ақ материалдың тығыз орналасқан аймақтары көрінеді, бұл тозуға төзімділікті арттыруға ықпал етеді. 3-суретте в мен а үлгілерін салыстырғанда құрылым тығыздау болған.

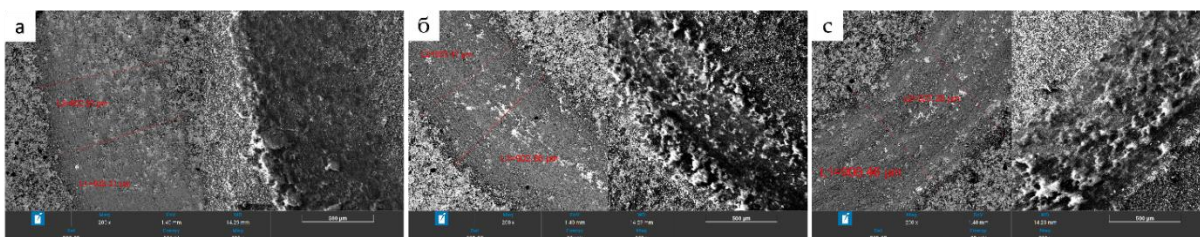
Шардың жабынмен жанасуы кезінде жүргізілген трибологиялық сынақтардан кейінгі тозу іздері СЭМ арқылы зерттелді, нәтижелері 4-суретте көрсетілген. 4а суретте бірінші үлгінің тозу ізінің ені 906–927 мкм болды. Іздің ішінде тегіс беттің болуы пластикалық деформация белгілерін көрсетеді. Ұсақ сызаттар мен із бойындағы ойықтар абразивтік тозудың белгілері болып табылады, бұл жабынның тозуға төзімділігін дәлелдейді, бірақ шар жүктемесі әсерінен ішінара деформацияға ұшырағанын көрсетеді. 4б суретте 2,1 бар қысымда алынған үлгі көрсетілген, мұнда тозу ізінің ені 932–952 мкм-ді құрайды. Бұл жабынның жүктеме әсеріне тұрақты екенін дәлелдейді. Сонымен қатар, кең тозу ізінің болуына қарамастан, жабын құрылымы тұтастығын сақтайды, жабын мен негіз арасындағы жоғары адгезия деңгейін, жабын бөлшектерінің шарға аз жабысуы оның беріктігін және жанасу жүктемелеріне төтеп бере алатынын көрсетеді. 4с суретте, 2,3 бар қысымда бүркелген үлгіге сәйкес, тозу ізінің ені 853–902 мкм-ді құрайды. Сонымен қатар, тозудың біркелкі болмауы жабынның құрылымдық біркелкі еместігін білдіруі мүмкін. Бірнеше аймақта жергілікті құрылымдық бұзылу белгілері байқалады, бұл материалдың пайдалану қасиеттерін төмендетеді.



2-сурет. $Al_{65}Cu_{20}Fe_{15}$ негізіндегі квазикристалдық жабынмен қапталған үлгілердің СЭМ арқылы алынған көлденең қимасының бейнесі: (а), (б) және (с) үлгілеріне 1-кестеде көрсетілген бүрку параметрлері сәйкес келеді

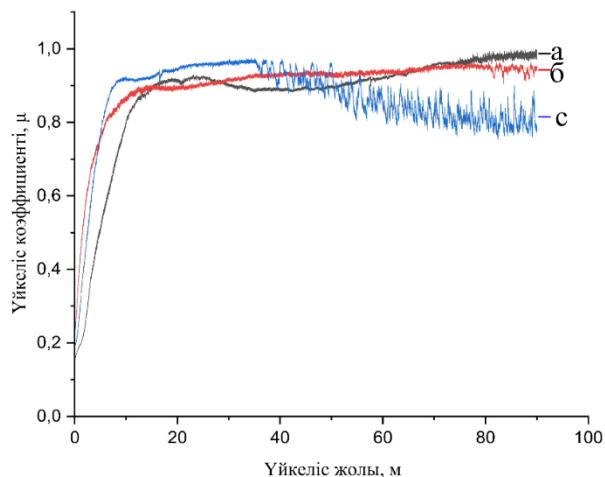


3-сурет. $Al_{65}Cu_{20}Fe_{15}$ жабындардың бет морфологиясы: (а), (б) және (с) үлгілеріне 1-кестеде көрсетілген бүрку параметрлері сәйкес келеді



4-сурет. $Al_{65}Cu_{20}Fe_{15}$ жабындарының тозу іздерінің СЭМ суреттері: (а), (б) және (с) үлгілеріне 1-кестеде көрсетілген бүрку параметрлері сәйкес келеді

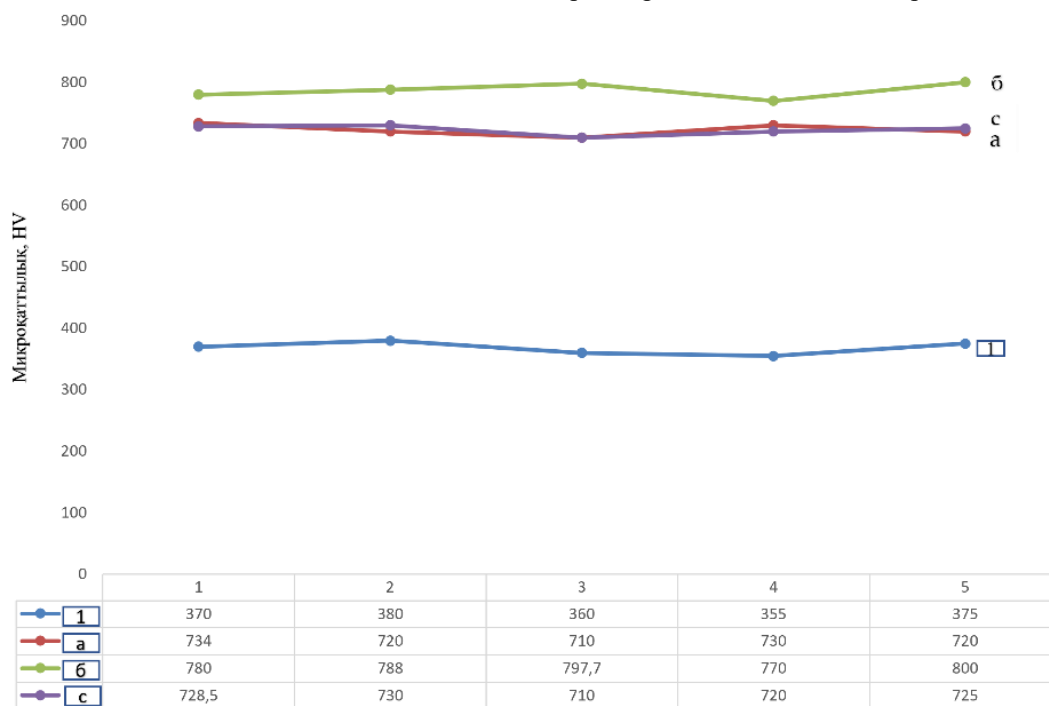
Үйкеліс коэффициентінің (μ) үйкеліс жолына (м) байланысты өзгерісі үш түрлі үлгі үшін салыстырмалы түрде талданды, олардың нәтижелері 5-суретте келтірілген. Бастапқы кезеңде (0–20 м) барлық үлгілерде үйкеліс коэффициентінің жылдам өсуі байқалады, бұл жұмыс беттерінің өзара бейімделу процесімен байланысты а үлгісі бастапқыда төмен мәннен басталады, бірақ тез тұрақтанады, ал (б) және (с) үлгілері шамамен бірдей деңгейге жетеді.



5-сурет. Үш үлгі үшін үйкеліс жолына (м) байланысты үйкеліс коэффициентінің (μ) өзгеруі: (а), (б) және (с) үлгілеріне 1-кестеде көрсетілген бұрку параметрлері сәйкес келеді.

20–60 м диапазонында (б) үлгісі ең тұрақты (μ) мәнін көрсетеді, бұл айтарлықтай секірістерсіз біркелкі үйкелісті білдіреді. (с) үлгісінде ең үлкен ауытқулар байқалады, бұл жабынның тұрақсыздығы мен мүмкін бұзылуын көрсете алады. Сонымен қатар, (а) үлгісі де тұрақты болып қалады, бірақ (б) үлгісіне қарағанда сәл төмен мән көрсетеді. 60–100 м кезеңінде (б) үлгісі тұрақты үйкеліс коэффициентін сақтайды, бұл оның жүктеменің жақсырақ таралуын және тозуға төзімділігін көрсетуі мүмкін. Ал (с) үлгісінде үйкеліс коэффициентінің айтарлықтай ауытқулары мен төмендеуі байқалады, бұл жабынның тұрақсыздығын көрсетеді. 2,1 бар қысымда шашыратып алынған үлгі (5б-сурет) бүкіл сырғу сынағы барысында үйкеліс коэффициентінің бірқалыптылығын сақтады, бұл жабынның тұтастығы мен тозуға төзімділігінің жоғары екенін көрсетеді. Бұл нәтижелер HVOF әдісінің тығыз әрі берік жабысқан квазикристалдық жабындарды қалыптастырудағы артықшылықтарын, сондай-ақ олардың циклдік жанасу жүктемесі жағдайында жоғары механикалық сенімділігі мен құрылымдық беріктігін айқын көрсетеді.

6-шы суретте HVOF әдісімен У8Г аспаптық болатына алынған $Al_{65}Cu_{20}Fe_{15}$ негізіндегі квазикристалды жабындардың Виккерс бойынша (HV) микрокаттылық мәндері көрсетілген. Жабындар бүркілер алдында У8Г болатынан жасалған негіздің бастапқы микрокаттылық мәні шамамен 380 HV болған. Бірінші а үлгінің (ауа қысымы 1,9 бар) микрокаттылық мәні шамамен 734 HV болды. Үшінші с үлгі (ауа қысымы 2,3 бар) шамамен 728,5 HV көрсетті, яғни бірінші үлгіге жақын нәтиже берді. Ал екінші (б) үлгі



6-сурет. HVOF әдісімен алынған $Al_{65}Cu_{20}Fe_{15}$ квазикристалды жабындарының Виккерс бойынша микрокаттылығы: (а), (б) және (с) үлгілеріне 1-кестеде көрсетілген бұрку параметрлері сәйкес келеді

(ауа қысымы 2,1 бар) ең жоғары микроқаттылық мәнін көрсетті, ол шамамен 800 HV-қа тең болды. Бұл нәтижелер 2,1 бар ауа беру режимінде алынған жабынның ең тығыз әрі берік құрылымға ие екенін көрсетеді. Оның жоғары микроқаттылығы жабынның механикалық жүктемелер мен тозуға төзімділігін арттырады, бұл оны үйкеліс күштері жоғары ортада қолдану үшін ең тиімді нұсқа етеді. Сонымен қатар, екінші үлгінің микроқаттылық мәндерінің шашырауы аз болғандықтан, оның құрылымының біртектілігі жоғары екенін көрсетеді, бұл оның пайдалану қасиеттерін одан әрі жақсартады.

Қорытынды

Бұл зерттеу барысында HVOF әдісі арқылы У8Г болатының бетіне алынған $\text{Al}_{65}\text{Cu}_{20}\text{Fe}_{15}$ негізіндегі квазикристалды жабындардың құрылымдық ерекшеліктері, трибологиялық қасиеттері және микроқаттылығы кешенді түрде зерттелді. СЭМ нәтижелері алынған жабындардың гомогенді құрылымға ие екенін, қалыңдығы бүрку режимдеріне байланысты 13-тен 34 мкм-ге дейін болғаны анықталды.

Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, бүрку параметрлерін оңтайлы таңдау жабынның морфологиясына, микроқаттылығына, трибологиясына әсер ететіндігі дәлелденді. Атап айтқанда, пропанның, оттегінің және ауаның қысымдары сәйкесінше 1,9 бар; 2,1 бар және 2,3 бар болған жағдайында алынған жабындар ең төменгі тозу ізінің енін (902 мкм) және тұрақты үйкеліс коэффициентін көрсетті, бұл олардың жоғары тозуға төзімділігін және үйкеліс кезінде тұрақты механикалық қасиеттерін дәлелдейді. Бірінші а үлгінің тозу ізінің ені 906–927 мкм болды. Ал микроқаттылық мәні шамамен 734 HV болды. Үшінші с үлгі шамамен 728,5 HV көрсетті, яғни бірінші үлгіге жақын нәтиже берді. Екінші б үлгі ең жоғары микроқаттылық мәнін көрсетті, ол шамамен 800 HV-қа тең болды. Бұл нәтижелер 2,1 бар ауа беру режимінде алынған жабынның ең тығыз әрі берік құрылымға ие екеніндігі анықталды.

Алғыс

Бұл зерттеуді Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті қаржыландырады (грант № AP26103943).

ӘДЕБИЕТТЕР

- Yeong-Ho, S.; Baek, S. H.; Kim, B. K.; Hwang, J. H.; Lee, J. H.; Song, G. D. Comparison of Durability and Gamma-Ray Shielding Performance of High-Velocity Oxygen Fuel Tungsten Carbide-Based Coatings on Cold-Rolled Steel Surface // *Crystals*. – 2025. – Vol. 15(1). – P. 21.
- Nie, H.; Li, Z.; Zhou, H.; Wu, J.; Wen, G.; Li, Y. Study on the wear resistance and mechanism of HVOF-sprayed WC10Co4Cr coatings // *Surf. Coat. Technol.* – 2024. – Vol. 494. – P. 131368.
- Kumar, V.; Verma, R. Effect of GNP and laser-surface texturing on HVOF sprayed WC10Co4Cr coatings for high-wear resistance // *Tribol. Int.* – 2023. – Vol. 178. – P. 108057.
- Kumar, R.; Sharma, S.; Singh, J.P.; Gulati, P.; Singh, G.; Dwivedi, S.P.; Li, C.; Kumar, A.; Tag-Eldin, E.M.; Abbas, M. Enhancement in wear-resistance of 30MnCrB5 boron steel-substrate using HVOF thermal sprayed WC–10% Co–4% Cr coatings: A comprehensive research on microstructural, tribological, and morphological analysis // *J. Mater. Res. Technol.* – 2023. – Vol. 27. – P. 1072–1096.
- Mishra, B.B.; Nautiyal, H. Frictional and wear behavior of Cr₃C₂-NiCr coating on AISI-304 stainless steel // *Adv. Mater. Process. Technol.* – 2022. – Vol. 8. – P. 4007–4017.
- Wen, Y.; Zhang, Y.; Zhang, X.; Zhao, Z.; Yan, Q. The tribological behavior of Cu-based brake materials against Cr₃C₂-NiCr coated steel disks with varying roughness. *Tribol. Trans.* 2024; accepted.
- Ge, Y.; Xi, H.; Kong, D. Structural Evolution, Phase Transition and High-Temperature Tribological Properties of Cr₃C₂ Reinforced WC-10Co4Cr Coatings by Laser Cladding // *Ind. Lubr. Tribol.* – 2025. – Vol. 77(4). – P. 582–591.
- Hao, K.; Huang, J.; Liu, H.; Wang, Z.; Qiu, Z.; Zheng, Z.; Zeng, D. Improving Thermal Shock and Oxidation Resistance of Cr₃C₂/WC-NiCr Cermet Coating by Embedding Large NiCrAlY Superalloy Particles // *Ceramics International*. – 2024. – Vol. 50(24). – P. 54737–54752.
- Torskaya E. V. et al. Processing and tribological properties of PEO coatings on AlZn5. 5MgCu aluminum alloy with incorporated Al-Cu-Fe quasicrystals // *Ceramics*. – 2023. – Vol. 6. – No. 2. – P. 858–871. <https://doi.org/10.3390/ceramics6020049>
- Fatoba O. S., Akinlabi S. A., Akinlabi E. T. Effects of Fe addition on the microstructure and corrosion properties of quasicrystalline Al-Cu-Fe coatings // 2018 IEEE 9th International Conference on Mechanical and Intelligent Manufacturing Technologies (ICMIMT). – IEEE, 2018. – C. 74-79. <https://doi.org/10.1109/ICMIMT.2018.8340424>
- Екимов Е. А. и др. Композитный материал на основе квазикристалла системы Al-Cu-Fe и способ его получения.
- Nascimento L., Melnyk A. Quasicrystalline Phase Formation of the Al₆₇Cu₂₆Fe₁₅ Alloy // *Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas*. – 2019. – Vol. 40. – No. 1. – P. 3–12. <https://doi.org/10.5433/1679-0375.2019v40n1p3>
- Пескова А. С. и др. Сплав на основе квазикристалла системы Al-Cu-Fe для нанесения износостойкого, наноструктурного покрытия. – 2011. <https://doi.org/10.26160/2658-3305-2023-19-185-189>
- Bakhtiari H. et al. The Methods of Quasicrystals Producing // *Journal of Environmental Friendly Materials*. – 2021. – Vol. 5. – No. 1. – P. 59–68.
- Фролов Г. О. и др. Теплофизические характеристики HVOF-покрытия из квазикристаллического сплава системы Al-Cu-Fe // *Двигуни внутрішнього згорання*. – 2022. – № 2. – С. 61–68.
- Polonsky V. A., Sukhova O. V. Development of composite material reinforced with decagonal quasicrystals for working in sea atmosphere // *Journal of Chemistry & Technologies*. – 2021. – Vol. 29. – No. 4. <http://chemistry.dnu.dp.ua/>
- Цетлин М. Б. и др. Композитный материал на основе политетрафторэтилена и квазикристаллического наполнителя Al-Cu-Fe с ультразвуком износом: морфология, трибологические и механические свойства

- //Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2018. – № 3. – С. 83–92.
18. Fatoba O. S. et al. Microstructural analysis, micro-hardness and wear resistance properties of quasicrystalline Al–Cu–Fe coatings on Ti-6Al-4V alloy //Materials Research Express. – 2018. – Vol. 5. – No. 6. – P. 066538. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aaca70>
 19. Nascimento L. Icosahedral Phase of $\text{Al}_{65}\text{Cu}_{25}\text{Fe}_{15}$ //Journal of Experimental Techniques and Instrumentation. – 2020. – Vol. 4. – No. 01. – P. 1–14. <https://doi.org/10.30609/jeti.v4i01.7558>
 20. Кунс Д. В. и др. Алюминиевый композит, армированный квазикристаллическими частицами Al-Cu-Fe //Труды БГТУ. Лесная и деревообрабатывающая промышленность. – 2015. – № 2 (175). – С. 229–233.
 21. Родникова И. С. и др. Композитный материал на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена и квазикристаллического наполнителя (Al-Fe-Cu) //Успехи в химии и химической технологии. – 2020. – Т. 34. – № 7 (230). – С. 129–131.
 22. Xin X. et al. Single-phase quasicrystalline Al–Cu–Fe thin film prepared by direct current magnetron sputtering on stainless steel //Thin Solid Films. – 2022. – Vol. 753. – P. 139272. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2022.139272>
 23. Чуков Д. И. и др. Полимер-квазикристаллическая порошковая композиция для получения антикоррозийных защитных покрытий. – 2017.
 24. Юдин Г. А., Абузин Ю. А., Тюрина С. А. Исследование термохимической стабильности квазикристаллов в высоконаполненном км системы 30% Cu-70% квазикристалл, полученного методом холодного газодинамического напыления //Международный научно-исследовательский журнал. – 2020. – № 12-1 (102). – С. 76–82.
 25. Мора Дж. и др. Твердые квазикристаллические покрытия, нанесенные методом высокоэнергетического термического напыления для уменьшения обледенения компонентов аэроконструкций // Покрытия. – 2020. – Т. 10. – № 3. – С. 290.
 26. Wolf W. 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.
 27. Souza T. A. et al. Analysis of the surface properties of Al-Cu-Fe-B and Al-Co-Cu quasicrystalline coatings produced by HVOF //MRS Communications. – 2021. – Vol. 11. – No. 6. – P. 873–878.
 28. Souza T. A. et al. Analysis of the surface properties of Al–Cu–Fe–B and Al–Co–Cu quasicrystalline coatings produced by HVOF //MRS Communications. – 2021. – Vol. 11. – No. 6. – P. 873–878.
 29. Parsamehr H. et al. Thermal spray coating of Al-Cu-Fe quasicrystals: Dynamic observations and surface properties //Materialia. – 2019. – Vol. 8. – P. 100432. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2019.100432>
 30. Li Z. et al. Microstructure and Tribological Properties of AlCuFeSc Coatings: Effects of Surface Roughness and Quasi-Crystalline i-Phase Content //Metallophysics & Advanced Technologies/Metallofizika i Novejsie Tehnologii. – 2022. – Vol. 44. – No. 12.
 31. Feitosa F. R. P. et al. Effect of oxygen/fuel ratio on the microstructure and properties of HVOF-sprayed $\text{Al}_{59}\text{Cu}_{25.5}\text{Fe}_{12.5}\text{B}_3$ quasicrystalline coatings //Surface and Coatings Technology. – 2018. – Vol. 353. – P. 171–178. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.08.081>
 32. Yang Q., Dolatabadi A., Golovin K. Durable Icephobic and Erosion Resistant Coatings Based on Quasicrystals // SAE Technical Paper. – 2023. – Vol. 1. – P. 1455. <https://doi.org/10.4271/2023-01-1455>
 33. Feitosa F. R. P. et al. Efeito da relação oxigênio/combustível na microestrutura e propriedades de revestimentos quasicristalinos AlCuFeB e AlCoCu produzidos por HVOF. – 2018.
 34. Сильва Гедес де Лима Б. А. и др. Само смазывающиеся, с низким коэффициентом трения, износостойкие квазикристаллические покрытия на основе алюминия // Наука и технология перспективных материалов. – 2016. – Т. 17. – № 1. – С. 71–79.
 35. Anusha K., Routara B. C., Guha S. A review on high-velocity oxy-fuel (HVOF) coating technique //Journal of The Institution of Engineers (India): Series D. – 2023. – Vol. 104. – No. 2. – P. 831–848.
 36. Рахадиллов Б. К., Муктанова Н., Журерова Л. Г. Применение технологии HVOF для получения износостойких покрытий на основе WC–обзор //Вестник НЯЦ РК. – 2023. – № 1. – С. 4–14. <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2023-1-4-14>
 37. Рахадиллов Б. К., Муктанова Н., Какимжанов Д. Н. Влияние варьирования расстояния напыления на структурно-фазовое состояние и механо-трибологические свойства покрытий на основе 86WC-10Co-4Cr, полученных методом HVOF // Вестник НЯЦ РК. – 2024. – № 3. – С. 91–104. <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2024-3-91-104>
 38. Галлямов А. М. и др. Восстановление эксплуатационных свойств ответственных деталей методом высокоскоростного напыления (HVOF) //Научно-технический вестник Поволжья. – 2015. – № 2. – С. 94–98.
 39. Тамбовцев А. С. и др. Нанесение защитных покрытий для топливно-энергетического комплекса методом плазменного напыления // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2022. – № 71. – С. 156–166. <https://doi.org/10.15593/2224-9982/2022.71.17>
 40. Anusha K., Routara B. C., Guha S. A review on high-velocity oxy-fuel (HVOF) coating technique //Journal of The Institution of Engineers (India): Series D. – 2023. – Vol. 104. – No. 2. – P. 831–848.
 41. Raza A. et al. An influence of oxygen flow rate and spray distance on the porosity of HVOF coating and its effects on corrosion — A review //Materials. – 2022. – Vol. 15. – No. 18. – P. 6329. <https://doi.org/10.3390/ma15186329>

REFERENCES

1. Yeong-Ho, S.; Baek, S. H.; Kim, B. K.; Hwang, J. H.; Lee, J. H.; Song, G. D. Comparison of Durability and Gamma-Ray Shielding Performance of High-Velocity Oxy-gen Fuel Tungsten Carbide-Based Coatings on Cold-Rolled Steel Surface // Crystals. – 2025. – Vol. 15(1). – P. 21.
2. Nie, H.; Li, Z.; Zhou, H.; Wu, J.; Wen, G.; Li, Y. Study on the wear resistance and mechanism of HVOF-sprayed WC10Co4Cr coatings //Surf. Coat. Technol. – 2024. – Vol. 494. – P. 131368.

3. Kumar, V.; Verma, R. Effect of GNP and laser-surface texturing on HVOF sprayed WC10Co4Cr coatings for high-wear resistance // *Tribol. Int.* – 2023. – Vol. 178. – P. 108057.
4. Kumar, R.; Sharma, S.; Singh, J.P.; Gulati, P.; Singh, G.; Dwivedi, S.P.; Li, C.; Kumar, A.; Tag-Eldin, E.M.; Abbas, M. Enhancement in wear-resistance of 30MnCrB5 boron steel-substrate using HVOF thermal sprayed WC–10% Co–4% Cr coatings: A comprehensive research on micro-structural, tribological, and morphological analysis // *J. Mater. Res. Technol.* – 2023. – Vol. 27. – P. 1072–1096.
5. Mishra, B.B.; Nautiyal, H. Frictional and wear behavior of Cr3C2–NiCr coating on AISI-304 stainless steel // *Adv. Mater. Process. Technol.* – 2022. – Vol. 8. – P. 4007–4017.
6. Wen, Y.; Zhang, Y.; Zhang, X.; Zhao, Z.; Yan, Q. The tribological behavior of Cu-based brake materials against Cr3C2–NiCr coated steel disks with varying roughness. *Tribol. Trans.* 2024; accepted.
7. Ge, Y.; Xi, H.; Kong, D. Structural Evolution, Phase Transition and High-Temperature Tribological Properties of Cr3C2 Reinforced WC–10Co4Cr Coatings by Laser Cladding // *Ind. Lubr. Tribol.* – 2025. – Vol. 77(4). – P. 582–591.
8. Hao, K.; Huang, J.; Liu, H.; Wang, Z.; Qiu, Z.; Zheng, Z.; Zeng, D. Improving Thermal Shock and Oxidation Resistance of Cr3C2/WC–NiCr Cermet Coating by Embedding Large NiCrAlY Superalloy Particles // *Ceramics International.* – 2024. – Vol. 50(24). – P. 54737–54752.
9. Torskaya E. V. et al. Processing and tribological properties of PEO coatings on AlZn5. 5MgCu aluminum alloy with incorporated Al–Cu–Fe quasicrystals // *Ceramics.* – 2023. – Vol. 6. – No. 2. – P. 858–871. <https://doi.org/10.3390/ceramics6020049>
10. Fatoba O. S., Akinlabi S. A., Akinlabi E. T. Effects of Fe addition on the microstructure and corrosion properties of quasicrystalline Al–Cu–Fe coatings // 2018 IEEE 9th International Conference on Mechanical and Intelligent Manufacturing Technologies (ICMINT). – IEEE, 2018. – P. 74–79. <https://doi.org/10.1109/ICMINT.2018.8340424>
11. Ekimov E. A. i dr. Kompozitnyy material na osnove kvazikristalla sistemy Al–Cu–Fe i sposob ego polucheniya.
12. Nascimento L., Melnyk A. Quasicrystalline Phase Formation of the Al67Cu26Fe15 Alloy // *Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas.* – 2019. – Vol. 40. – No. 1. – P. 3–12. <https://doi.org/10.5433/1679-0375.2019v40n1p3>
13. Peskova A. S. i dr. Splav na osnove kvazikristalla sistemy Al–Cu–Fe dlya naneseniya iznosostoykogo, nanostrukturnogo pokrytiya. – 2011. <https://doi.org/10.26160/2658-3305-2023-19-185-189>
14. Bakhtiari H. et al. The Methods of Quasicrystals Producing // *Journal of Environmental Friendly Materials.* – 2021. – Vol. 5. – No. 1. – P. 59–68.
15. Frolov G. O. i dr. Teplofizicheskie kharakteristiki HVAF-pokrytiya iz kvazikristallicheskogo splava sistemy Al–Cu–Fe // *Dviguni vnutrishn'ogo zgoryannya.* – 2022. – No. 2. – P. 61–68.
16. Polonsky V. A., Sukhova O. V. Development of composite material reinforced with decagonal quasicrystals for working in sea atmosphere // *Journal of Chemistry & Technologies.* – 2021. – Vol. 29. – No. 4. <http://chemistry.dnu.dp.ua/>
17. Tsetlin M. B. i dr. Kompozitnyy material na osnove politetraforetilena i kvazikristallicheskogo napolnitelya Al–Cu–Fe s ul'tranizkim iznosom: morfolo-giya, tribologicheskie i mekhanicheskie svoystva // *Poverkhnost'. Rentgenovskie, sinkhrotronnye i neytronnye issledovaniya.* – 2018. – No. 3. – P. 83–92.
18. Fatoba O. S. et al. Microstructural analysis, micro-hardness and wear resistance properties of quasicrystalline Al–Cu–Fe coatings on Ti–6Al–4V alloy // *Materials Research Express.* – 2018. – Vol. 5. – No. 6. – P. 066538. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aaca70>
19. Nascimento L. Icosahedral Phase of Al65Cu25Fe15 // *Journal of Experimental Techniques and Instrumentation.* – 2020. – Vol. 4. – No. 01. – P. 1–14. <https://doi.org/10.30609/jeti.v4i01.7558>
20. Kuis D. V. i dr. Alyuminiyevyy kompozit, armirovanny kvazikristallicheskim chastsitsami Al–Cu–Fe // *Trudy BGTU. Lesnaya i derevoobrabatvyayushchaya promyshlennost'.* – 2015. – No. 2 (175). – P. 229–233.
21. Rodnikova I. S. i dr. Kompozitnyy material na osnove sverkhvysokomolekulyarnogo polietilena i kvazikristallicheskogo napolnitelya (Al–Fe–Cu) // *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii.* – 2020. – Vol. 34. – No. 7 (230). – P. 129–131.
22. Xin X. et al. Single-phase quasicrystalline Al–Cu–Fe thin film prepared by direct current magnetron sputtering on stainless steel // *Thin Solid Films.* – 2022. – Vol. 753. – P. 139272. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2022.139272>
23. Chukov D. I. i dr. Polimer-kvazikristallicheskaya poroshkovaya kompozitsiya dlya polucheniya antikorroziynykh zashchitnykh pokrytiy. – 2017.
24. Yudin G. A., Abuzin Yu. A., Tyurina S. A. Issledovanie termokhimicheskoy stabil'nosti kvazikristallov v vysokonapolnennom km sistemy 30% Cu–70% kvazikristall, poluchennogo metodom kholodnogo gazodinamicheskogo napyleniya // *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal.* – 2020. – No. 12-1 (102). – P. 76–82.
25. Mora Dzh. i dr. Tverdye kvazikristallicheskie pokrytiya, nanesennye metodom vysokoenergeticheskogo termicheskogo napyleniya dlya umen'sheniya obledeniya komponentov aerokonstruktsiy // *Pokrytiya.* – 2020. – Vol. 10. – No. 3. – S. 290.
26. Wolf W. 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.
27. Souza T. A. et al. Analysis of the surface properties of Al–Cu–Fe–B and Al–Co–Cu quasicrystalline coatings produced by HVOF // *MRS Communications.* – 2021. – Vol. 11. – No. 6. – P. 873–878.
28. Souza T. A. et al. Analysis of the surface properties of Al–Cu–Fe–B and Al–Co–Cu quasicrystalline coatings produced by HVOF // *MRS Communications.* – 2021. – Vol. 11. – No. 6. – P. 873–878.
29. Parsamehr H. et al. Thermal spray coating of Al–Cu–Fe quasicrystals: Dynamic observations and surface properties // *Materialia.* – 2019. – Vol. 8. – P. 100432. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2019.100432>
30. Li Z. et al. Microstructure and Tribological Properties of AlCuFeSc Coatings: Effects of Surface Roughness and Quasi-Crystalline i-Phase Content // *Metallophysics &*

- Advanced Technologies/Metallofizika i Novejsie Tehnologii. – 2022. – Vol. 44. – No. 12.
31. Feitosa F. R. P. et al. Effect of oxygen/fuel ratio on the microstructure and properties of HVOF-sprayed $Al_{59}Cu_{25.5}Fe_{12.5}B_3$ quasicrystalline coatings // Surface and Coatings Technology. – 2018. – Vol. 353. – P. 171–178. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.08.081>
 32. Yang Q., Dolatabadi A., Golovin K. Durable Icephobic and Erosion Resistant Coatings Based on Quasicrystals // SAE Technical Paper. – 2023. – Vol. 1. – P. 1455. <https://doi.org/10.4271/2023-01-1455>
 33. Feitosa F. R. P. et al. Efeito da relação oxigênio/combustível na microestrutura e propriedades de revestimentos quasicristalinos $AlCuFeB$ e $AlCoCu$ produzidos por HVOF. – 2018.
 34. Sil'va Gedes de Lima B. A. i dr. Samo smazyvayu-shchi- esya, s nizkim koeffitsientom treniya, iznosostoykie kvazikrystallicheskie pokrytiya na osnove alyuminiya // Nauka i tekhnologiya perspektivnykh materialov. – 2016. – T. 17. – No. 1. – P. 71–79.
 35. Anusha K., Routara B. C., Guha S. A review on high-velocity oxy-fuel (HVOF) coating technique // Journal of The Institution of Engineers (India): Series D. – 2023. – Vol. 104. – No. 2. – P. 831–848.
 36. Rakhadilov B. K., Muktanova N., Zhurero L. G. Primenenie tekhnologii HVOF dlya polucheniya iznosostoykikh pokrytiy na osnove WC-obzor // Vestnik NYaTs RK. – 2023. – No. 1. – P. 4–14. <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2023-1-4-14>
 37. Rakhadilov B. K., Muktanova N., Kakimzhanov D. N. Vliyaniye var'irovaniya rasstoyaniya napyleniya na strukturno-fazovoe sostoyaniye i mekhano-tribologicheskie svoystva pokrytiy na osnove $86WC-10Co-4Cr$, poluchennykh metodom HVOF // Vestnik NYaTs RK. – 2024. – No. 3. – P. 91–104. <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2024-3-91-104>
 38. Gallyamov A. M. i dr. Vosstanovleniye ekspluatatsionnykh svoystv otvetstvennykh detaley metodom vysokoskorostnogo napyleniya (HVOF) // Nauchno-tekhnicheskiy vestnik Povolzh'ya. – 2015. – No. 2. – P. 94–98.
 39. Tambovtsev A. S. i dr. Naneseniye zashchitnykh pokrytiy dlya toplivno-energeticheskogo kompleksa metodom plazmennogo napyleniya // Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika. – 2022. – No. 71. – S. 156–166. <https://doi.org/10.15593/2224-9982/2022.71.17>
 40. Anusha K., Routara B. C., Guha S. A review on high-velocity oxy-fuel (HVOF) coating technique // Journal of The Institution of Engineers (India): Series D. – 2023. – Vol. 104. – No. 2. – P. 831–848.
 41. Raza A. et al. An influence of oxygen flow rate and spray distance on the porosity of HVOF coating and its effects on corrosion — A review // Materials. – 2022. – Vol. 15. – No. 18. – P. 6329. <https://doi.org/10.3390/ma15186329>

RESEARCH OF TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF $Al_{65}Cu_{20}Fe_{15}$ QUASICRYSTALLINE COATINGS OBTAINED BY HVOF METHOD

S. R. Kurbanbekov, A. N. Abdimutalip*, D. E. Baltabayeva

Khoja Ahmed Yasawi International Kazakh-Turkish University, Turkestan, Kazakhstan

** E-mail for contacts: aray.abdimutalip@bk.ru*

This research investigates the tribological properties and microhardness of $Al_{65}Cu_{20}Fe_{15}$ quasicrystalline coatings deposited on U8G tool steel using the high-velocity oxy-fuel (HVOF) method. Special attention is given to the effect of air supply pressure (1.9 bar, 2.1 bar, 2.3 bar) on the wear resistance of the coatings. The research was conducted using the ball-on-disk method, while the microstructure was analyzed with a scanning electron microscope (SEM). The coating deposited at a propane pressure of 2 bar, oxygen pressure of 2.1 bar, and air pressure of 2.1 bar exhibited the smallest wear track width (902 μm) and a stable friction coefficient ($\mu \approx 0.4$), confirming its wear resistance. The Vickers microhardness of the coating reached 800 HV, indicating high strength. These findings highlight the potential of quasicrystalline coatings for use in high-wear environments, particularly in the aerospace, automotive, and mechanical engineering industries. The research aligns with the Sustainable Development Goals, specifically the “Industry, Innovation, and Infrastructure” initiative, by contributing to the development of wear-resistant coatings with enhanced performance characteristics.

Keywords: HVOF method, $Al_{65}Cu_{20}Fe_{15}$, U8G, industrialization, innovation, and infrastructure.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КВАЗИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ $Al_{65}Cu_{20}Fe_{15}$, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ HVOF**Ш. Р. Курбанбеков, А. Н. Абдимуталип*, Д. Э. Балтабаева***Международный казахско-турецкий университет им. Ходжи Ахмеда Ясави, Туркестан, Казахстан*** E-mail для контактов: aray.abdimutalip@bk.ru*

В данной работе исследованы трибологические свойства и микротвердость квазикристаллических покрытий $Al_{65}Cu_{20}Fe_{15}$, нанесенных методом высокоскоростного газопламенного напыления (HVOF) на инструментальную сталь У8Г. Особое внимание уделено влиянию режима подачи воздуха (1,9 бар, 2,1 бар, 2,3 бар) на износостойкость покрытий. Исследование проводилось методом «шар-диск», а микроструктура анализировалась с использованием сканирующего электронного микроскопа (СЭМ). Образец, напыленный при пропане 2 бар, кислороде 2,1 бар и воздухе 2,1 бар, показал наименьшую ширину износной дорожки (902 мкм) и стабильный коэффициент трения ($\mu \approx 0,4$), что подтверждает его износостойкость. Микротвердость покрытия, измеренная методом Виккерса, составила 800 HV, что свидетельствует о его высокой прочности. Данные результаты подчеркивают перспективность применения квазикристаллических покрытий в условиях интенсивного износа, особенно в авиационной, автомобильной и машиностроительной промышленности. Исследование соответствует целям устойчивого развития, в частности направлению «Индустриализация, инновации и инфраструктура», способствуя разработке износостойких покрытий с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

Ключевые слова: метод HVOF, $Al_{65}Cu_{20}Fe_{15}$, У8Г, индустриализация, инновации и инфраструктура.