

Данияр Нуржанович Нурғалиев – «Техникалық физика және жылуэнергетикасы» кафедрасының аға оқытушысы, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: daniarsemei@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1650-1077>.

Information about the authors

Askar Bagdatovich Kassymov – PhD, Member of the Board - Vice-Rector for Strategy and Social Development, Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: askar.kassymov@shakarim.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1983-6508>.

Temirlan Nurlanuly Umyrzhan* – doctoral student of the educational programme 8D05302-«Technical Physics» of the Department of «Technical Physics and Heat Power Engineering», Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: timirlan-95@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-9111-1975>.

Anuar Almasbekovich Bektemissov – researcher, Department of Technical Physics and Heat Power Engineering, Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: anuar.bektemissov@icloud.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0364-4632>.

Zhandos Kairbekuly Akishov – doctoral student of the educational programme 8D05302-«Technical Physics» of the Department of «Technical Physics and Heat Power Engineering», Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: zhandosakishov@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-0205-6269>.

Daniyar Nurjanovich Nurgaliev – senior lecturer, Department of Technical Physics and Heat Power Engineering, Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: daniarsemei@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1650-1077>.

Поступила в редакцию 25.01.2026

Поступила после доработки 10.03.2026

Принята к публикации 10.03.2026

[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1\(21\)-63](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-63)

MPHTI: 31.17.15



**Д.А. Әскержанов^{1,*}, Р.К. Кусаинов^{1,2}, А.Ж. Жасұлан^{1,2}, К.Д. Орманбеков¹,
А.Б. Шынарбек¹**

¹Шәкәрім университеті, Инжиниринг орталығы,
071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинка, 20 А

²Шәкәрім университеті,
071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинка, 20 А

*e-mail: dumanaskerzhanov541@gmail.com.

HVOF ӘДІСІМЕН АЛЫНҒАН Cr_3C_2 –NiCr ЖАБЫНДАРЫНЫҢ ҚҰРЫЛЫМДЫҚ, ТРИБОЛОГИЯЛЫҚ ЖӘНЕ КОРРОЗИЯЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІ

Аңдатпа: Бұл зерттеу жұмысы жылу электр орталығының қазандық құбырларын жасауға кеңінен қолданылатын 12Х1МФ тот баспайтын болаттан қызмет мерзімін арттыруға бағытталған. Жоғары жылдамдықты оттек-отын жалынды бүрку (HVOF) әдісімен Cr_3C_2 –NiCr жабындары алынып, олардың құрылымдық, фазалық, механикалық, трибологиялық және коррозиялық қасиеттері зерттелді. Болат үлгілерінің жабын төселетін беткі қабатын алдын ала 100°C және 200°C температурада қыздырудың жабынның микроструктуралық күйі мен қасиеттеріне әсері қыздырылмаған үлгілермен салыстырмалы түрде бағаланды. Жабындардың көлденең қимасын СЭМ талдау нәтижелері барлық режимдерде алынған жабындар біртекті құрылымға ие екенін көрсетті. Болат үлгілерін алдын ала қыздыру жабын мен төсеніш шекарасында тығыз қабаттың қалыптасуына себеп болады. Рентгендік дифракциялық талдау нәтижелері зерттелген жабындарда Cr_3C_2 –Ni жүйесінің фазалық тұрақтылығы сақталатынын көрсетті. Алынған нәтижелер бойынша 100°C температурада алдын ала қыздырылған үлгілер ең жоғарғы қасиеттер жиынтығын көрсетті: микроаттылықтың жоғары мәні (897,8 HV), беткі кедір-бұдырлықтың төмендеуі, тозу ізінің диаметрінің минималды мәні (712 мкм) және коррозия тоғының тығыздығының төмендеуі байқалды.

©Д.А. Әскержанов, Р.К. Кусаинов, А.Ж. Жасұлан, К.Д. Орманбеков, А.Б. Шынарбек, 2026

Жалпы алғанда, зерттеу нәтижелері HVOF әдісімен алынған $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ жабындарының 12X1МФ болаты үшін тозуға және коррозияға төзімді қорғаныш қабаты ретінде қолдану мүмкіндігін көрсетеді және оларды жоғары температуралы агрессивті ортада пайдалануға перспективалы материалдар ретінде қарастыруға мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: Жоғары жылдамдықты оттекті-отын жалынды бүрку (HVOF), 12X1МФ тот баспайтын болат, коррозия, трибология, кедір-бұдырлық, қаттылық.

Кіріспе

Жылу электр орталықтарында қазандық құбырлары жоғары температура әсерінен температуралық шаршауға ұшырайды. Нәтижесінде металл морттанып, ұзақ уақыт ішінде құбыр қабырғасының қалыңдығы азаяды. Сонымен қатар су буымен және қышқыл газдармен әрекеттесу нәтижесінде коррозия дамиды. Қатты бөлшектердің (күл, шлак және т.б.) жоғары жылдамдықпен құбыр немесе жабдық бетіне соғылуы эрозиялық тозуды тудырады.[1]. Әсіресе отын сапасы төмен болған жағдайда, шлак пен күлдің көп болуы тозу процесін жылдамдатады. Қазандық суы сапасыз болғанда, тұздар мен қоспалар құбырдың ішкі бетінде қатты қақ түзеді [2]. Қалыптасқан қақ қабаты жылу алмасуды төмендетіп, металдың қызып кетуі салдарынан жарылу қаупін тудырады. Агрессивті ортада жұмыс істейтіндіктен, олардың мерзімінен бұрын тозуы өндірістік қауіпсіздікке қауіп төндіріп, экономикалық шығындарға әкеледі [3-4].

Осы мәселелерді шешу мақсатында жоғары жылдамдықты оттекті-отын жалынды бүрку (HVOF) әдісімен 12X1МФ тот баспайтын болаттан жасалған үлгілердің бетіне хром карбиді-никель хром ($\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$) жабынын алу болды.

Қазіргі таңда жоғары жылдамдықты оттекті-отын жалынды бүрку әдісі – эрозияға, коррозияға және тозуға төзімді жабындар жасауда кеңінен қолданылып, жақсы нәтижелер береді [5]. Dominique Poirier және басқалары [6] жұмысында бүрку кезінде пайда болатын карбидтің еруі келесі салдарға әкеледі: Cr_3C_2 жабындардың тозуға төзімділігіне айтарлықтай әсер етсе, NiCr плазмалық бүріккіш жабындары әдетте олар карбидтермен байланыс түзуімен жабынның механикалық қасиеттеріне айтарлықтай ықпалын тигізеді. Негізгі артықшылықтары жоғары адгезия (60-100 МПа дейін), төмен кеуектілік, жоғары температураға, эрозияға және коррозияға төзімді, бөлшек материалы құрылымдық өзгерістерге ұшырамайды [7-8].

Зерттеудің негізгі мақсаты – ЖЭО-дағы қазандық құбырларының ұзақ мерзімде жұмыс жасау жағдайын арттыру үшін $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ жабынын HVOF әдісімен алып, коррозияға төзімділікті, тозуға төзімділігін арттыру үшін зерттеу жасау. Алынған нәтижелер беттік бүрку арқылы жабын қалыптастыру саласына материал қасиеттері өзгеруіндегі процесстер туралы ақпараттар береді.

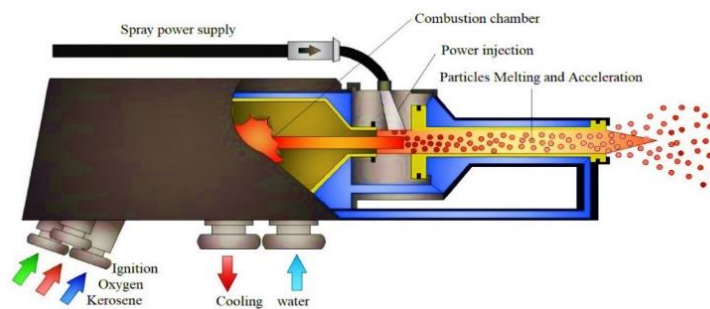
Материалдар мен әдістер

Жабын алу үшін 30-42 мкм хром карбиді-никель хром ($\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$) ұнтағы қолданылды. Жабынды таңдалып алынған өлшемі 5x5 мм, қалыңдығы 4 мм шаршы 12X1МФ тот баспайтын болат үлгілері бетіне алынды.

Арнайы [9] стандартқа сәйкес келетін 12X1МФ тотбаспайтын болатты таңдау себебі қазандық құбырлары (буқыздырғыш, қайта қыздырғыш.), жоғары қысымды бу магистральдары, коллекторлар мен арматура, қазандықтардың буқыздырғыштары мен бу коллекторларындағы жұмыс шарттарына сәйкес келеді.

Жабын алу алдында үлгілер 120Р - 600Р тегістеу қағазы көмегімен өңделіп, құммен атқылау арқылы жоғары қысымды ауа ағынымен құм түйіршігі бетке соғылып, оны кедір-бұдырлау әдісі қолданылды[10]. Үлгілер бірнеше температура шамасында алдын ала қыздырылды (қыздырылмаған, 100°C, 200°C), әр бүрку уақыты 15 с құрады [11]. Жабындар 1-суретте көрсетілген JP 5000 маркалы қондырғысында алынды. JP 5000 – сұйық отынмен (керосин) жұмыс істейтін жоғары қысымды жандырғышы сұйық отын мен оттегі жануы нәтижесінде аса жоғары қысымды, жоғары жылдамдықты газ ағынын түзеді, нәтижесінде ұнтақ газ ағынында болады да жақсы қызады.

Жабынның фазалық құрамын талдау үшін X'PertPRO рентгендік диффрактометр пайдаланылды, қондырғы Cu-K α ($\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$) сәулеленуімен жұмыс істейді. Алынған үлгілер 20-90° бұрыштық диапазонда, 0,02° қадаммен және санау уақыты бір қадамға 0,5 секунд ұзақтығымен дифракциялық заңдылықтар көмегімен HighScore бағдарламасында зерттелді.



Сурет 1 – JP 5000 қондырғысы

SEM3200 көмегімен үлгілердің құрылымын талдау үшін сканерлеуші электрондық микроскопия (СЭМ) пайдаланылды. Бұл құрал EDS көмегімен химиялық құрамды талдайды. Электрон көзі ретінде вольфрам жіпі пайдаланылды.

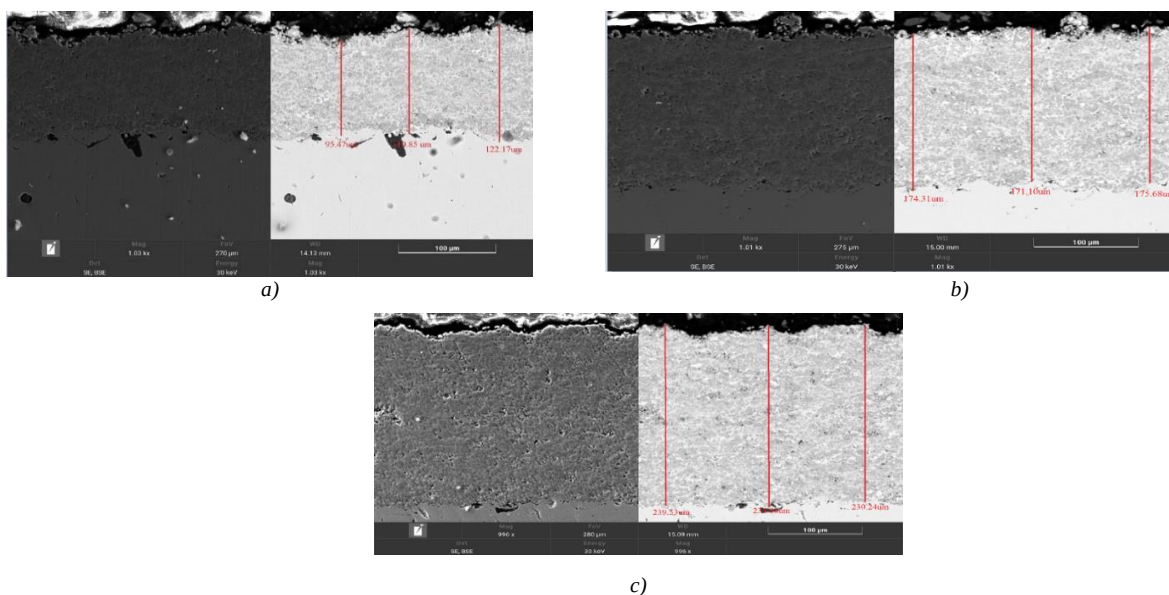
Кедір-бұдырлықты өлшеу Anytester HY2300 профилометрының көмегімен жүргізілді. Жабындардың көлденең қимасында микроқаттылық Vickers HLV-1DT микроқатты өлшегішімен келесі режимде анықталды: шегініс жүктемесі 2 Н және жүктеме әсер ету ұзақтығы 10 секунд.

Үлгілердің трибологиялық қасиеттері Anton Paar TRB3 трибометрының көмегімен зерттелді, бұл ретте үлгіні жабынның беті штанганың ұшына бекітілген 100X6 болаттан (WX15 эквиваленты) жасалған диаметрі 3 мм шардың траекториясына перпендикуляр болатындай етіп орналастырды. Тозу бетінің қисықтық радиусы ығысу сенсоры арқылы реттелді, ал үйкелісті өтеу сенсоры үйкеліс коэффициентін уақыт бойынша өлшеді. Тәжірибелер ашық ауада 10 Н жүктемемен және 5 см/с жылдамдықпен жүргізілді, тозу бетінің қисықтық радиусы 1,5 мм, ал үйкеліс жолының ұзындығы 100 мм қылып орнатылды.

Коррозияға төзімділік CS936 моделді стандартты үш электродты қондырғыда жалпақ коррозиялық ұяшығымен жалғанған CS300M потенциостат-гальваностат (Corrtest Instruments, Ухань, Қытай) көмегімен потенциодинамикалық поляризация арқылы бағаланды. Жұмыс электроды 1 см² ашық алаңы бар үлгі болды. Салыстыру электроды ретінде қаныққан Ag/AgCl электрод, ал анти-электрод ретінде платина торы қолданылды. Сынақтар 3,5% концентрациялы NaCl ерітіндісінде жүргізілді, бөлме температурасы 25°C болды. Потенциодинамикалық поляризацияны анықтау алдында ашық тізбектің потенциалы 30 минут ішінде тұрақтандырылды [12].

Нәтижелер

2-суретте сканерлеуші электронды микроскоп (СЭМ) көмегімен алынған, жоғары жылдамдықты оттекті-отын жалынды бүрку (HVOF) әдісімен қалыптастырылған Cr₃C₂-NiCr жабындарының көлденең қималары көрсетілген.

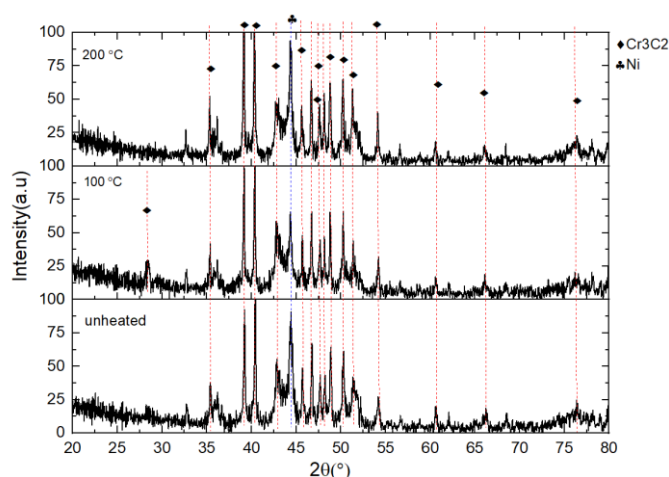


Сурет 2 – 1000x үлкейтуі бар үлгілердің көлденең қимасы СЭМ кескіндері:
(а) қыздырылмаған, (б) 100°C (с) 200°C

СЭМ кескіндерінен жабын мен негіздің шекара аймағында айтарлықтай ірі жарықшақтар байқалмайды. Бұл алдын ала қыздырудың жабынның негізбен байланысына оң әсер етуінде. Алдын ала қыздыру температурасының өзгеруіне қарамастан, жабындардың жалпы қалыңдығы айтарлықтай айырмашылық көрсетпейді, бұл жабын қалыңдығының негізінен HVOF бүрку режимдерімен байланысты (әрбір бүрку уақыты 15 с, бүрку қашықтығы 400 мм және ұнтақ беру жылдамдығы 60 г/мин).

Жабын құрылымының тығыз қалыптасқаны байқалады. HVOF әдісімен алынған Cr_3C_2 –NiCr жабындары үшін тән құбылыс болып табылады. Мұндай жабындардың кеуектілігі әдетте 1-3% аралығында [13]. Кеуектіліктің төмен болуы жабынның жоғары тығыздығын қамтамасыз етіп, оның тозуға төзімділігі мен коррозияға қарсы қасиеттерінің жақсаруына қолайлы жағдай жасайды [14].

Фазалық құрамын рентгендік дифракциялық талдау нәтижесінде HVOF әдісімен алынған Cr_3C_2 –NiCr жабындарының фазалық құрамы зерттелді 3-сурет. Өртүрлі температурада алдын ала қыздырылған үлгілердің негізгі фазалар ретінде Cr_3C_2 карбиді және Ni-негізді матрица анықталды. Cr_3C_2 фазасына сәйкес келетін дифракциялық шыңдар $2\theta = 37$ – 45° бұрыштар аралығында байқалды, ал $2\theta = 44^\circ$ маңында Ni фазасына сәйкес келеді.



Сурет 3-(XRD) Cr_3C_2 –NiCr жабынының фазалар графигі.

Алдын ала қыздыру температурасының өзгерістері қарамастан, барлық үлгілерде жаңа фазалардың пайда болуы немесе бастапқы фазалардың жойылуы байқалмайды. Бұл зерттелген температуралық режимдерде Cr_3C_2 –Ni жүйесінің фазалық тұрақтылығы сақталатынын көрсетеді. Дифракциялық шыңдардың сақталуы карбид фазасының термиялық өзгеріске ұшырамағанын және никель негізді матрицаның құрылымдық тұрақтылығын білдіреді.

Температураның өзгерістері дифрактограммалардағы шыңдардың жалпы сипатын айтарлықтай өзгертпейді, алайда шың пішініндегі шамалы айырмашылықтар кристаллит өлшемдерінің ұлғаюымен және жабында қалыптасқан қалдық кернеулердің азаюымен байланысты. Мұндай өзгерістер фазалық құрамның өзгеруін емес, керісінше, жабын құрылымының реттелуін және тұрақтануын сипаттайды [15].

Алдын ала қыздыру жағдайында Cr_3C_2 –NiCr жабындарының фазалық тұрақтылығының сақталуы олардың пайдалану қасиеттері үшін маңызды болып табылады, себебі карбид фазасының сақталуы жабынның жоғары қаттылығын, тозуға және коррозияға төзімділігін қамтамасыз етеді. 100 °C және 200 °C температурада алдын ала қыздыру HVOF әдісімен алынған Cr_3C_2 –NiCr жабындарының фазалық құрамына теріс әсер етпей, құрылымдық тұрақтылықты қамтамасыз ететінін көрсетеді [14,16].

2-кестеде Cr_3C_2 –NiCr жабынының беткі кедір-бұдырлығының үлгіні алдын ала қыздыру температурасына тәуелді өзгерістері көрсетілген. Қыздырылмаған жағдайда жабынның орташа арифметикалық кедір-бұдырлығы (Ra) 3,996 мкм, ал биіктік бойынша параметрі (Rz) 19,176 мкм құрады. Үлгіні 100°C температурада алдын ала қыздырғанда бұл көрсеткіштер төмендеп, Ra (3,247 мкм) және Rz (15,771 мкм) мәндеріне жетті, бұл жабын бетінің салыстырмалы түрде тегіс қалыптасқанын көрсетеді.

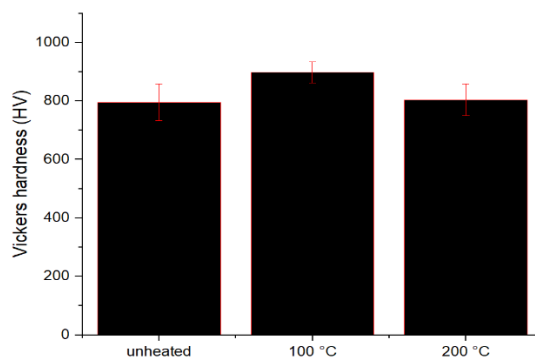
Кесте 2 – (Anytester HY2300) орташа арифметикалық кедір-бұдырлығы

Үлгі	Ra(мкм)	Rz(мкм)
қыздырылмаған	3,9964	19,1756
100 °C	3,2474	15,7712
200 °C	3,7514	18,8422

Температура 200°C-қа дейін арттырылғанда Ra (3,751 мкм) және Rz (18,842 мкм) мәндерінің қайта өсуі байқалады, бұл жабын түзілу процесінде жылулық кернеулердің қайта бөлінуімен және микроструктуралық гетерогенділіктің артуымен байланысты болуы мүмкін.

Алынған нәтижелерге сәйкес, 100 °C температурадағы алдын ала қыздыру Cr₃C₂–NiCr жабындары үшін оңтайлы режим болып табылады, себебі ол беткі қабаттың тегістігін қамтамасыз етіп, микроқатпарлардың азаюына ықпал етеді және жабынның трибологиялық әрі коррозиялық қасиеттерінің жақсаруына қолайлы жағдай жасайды [17].

12X1МФ тот баспайтын болатының бастапқы микроқаттылығы шамамен 180 HV құрайды. Cr₃C₂–NiCr жабыны қалыптастырылғаннан кейін жабынның микроқаттылығы айтарлықтай артқаны байқалды. Қыздырылмаған үлгіде қаттылық 795,4 HV болса, 100°C температурада алдын ала қыздырылған үлгі үшін жоғары мән 897,8 HV тіркелді. Ал алдын ала қыздыру температурасы 200°C-қа дейін арттырылғанда микроқаттылық 804,1 HV-ға дейін төмендеді (4-сурет).

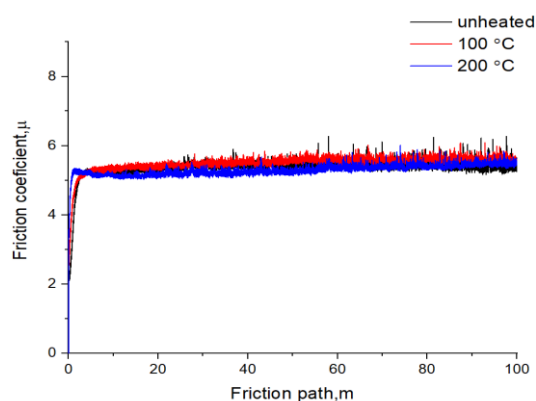


Сурет 4 – Cr₃C₂–NiCr жабыны алынғаннан кейінгі микроқаттылығын салыстыру

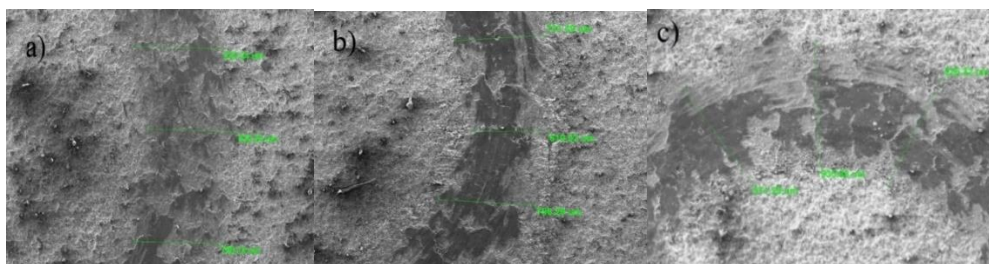
Алынған нәтижелерді түсіндіру үшін жабын түзілу процесінде температураның жоғарылауына байланысты қалдық термиялық кернеулердің қайта бөлінуі және құрылымдық қайта бірігу үрдістері бар болуында [14]. Жалпы алғанда, температуралық режимдердің өзгеруіне қарамастан, барлық жағдайларда Cr₃C₂–NiCr жабындарының қаттылығы бастапқы субстратпен салыстырғанда бірнеше есе жоғары болып қалды. Сонымен қатар, 100 °C температурада алынған жабын үшін беткі кедір-бұдырлықтың төмен мәндері жабын құрылымының салыстырмалы түрде тығыз әрі біркелкі қалыптасқанын көрсетеді. Кеуектіліктің азаюы микроқаттылықтың артуына қолайлы жағдай жасап, жабынның механикалық қасиеттерін жақсартуға ықпал етеді [18]. Бұл Cr₃C₂–NiCr жабындарының жоғары беріктікке және тозуға төзімділікке ие тиімді қорғаныш қабаты болып табылатынын көрсетеді және оларды жоғары температуралық жағдайларда қолдану тұрғысынан жақсартылған материалдар ретінде қарастыруға мүмкіндік береді [19].

Алынған нәтижелерге сәйкес, 100 м дейінгі үйкеліс қашықтығында жүргізілген трибологиялық сынақтар барысында үйкеліс коэффициентінің орташа мәндері алдын ала қыздыру температурасына байланысты белгілі бір айырмашылықтар ғана көрсетеді (5-сурет). Үйкеліс коэффициентінің салыстырмалы түрде төмен мәні 200°C температурада алдын ала қыздырылған үлгі үшін байқалды ($\mu = 0,529$), ал қыздырылмаған және 100 °C үлгілер үшін бұл көрсеткіштер сәйкесінше $\mu = 0,537$ және $\mu = 0,549$ құрады.

Сонымен бірге, тозуға төзімділік көрсеткіштерін талдау барысында ең қолайлы нәтижелер 100 °C температурада алдын ала қыздырылған Cr₃C₂–NiCr жабынына тән екені байқалады. Бұл тұжырым 6-суретте келтірілген тозу морфологиясымен және тозу ізінің геометриялық параметрлерімен үйлеседі. Атап айтқанда, 100 °C үлгі үшін тозу ізінің орташа диаметрі ең төмен мәнге ие болды ($d = 712$ мкм), ал қыздырылмаған ($d = 815$ мкм) және 200 °C ($d = 924$ мкм) үлгілерінде тозу қарқындылығы салыстырмалы түрде жоғарырақ екені анықталды [20-23].



Сурет 5 – Трибологиялық зерттеулердің нәтижелері



Сурет 6 – Үйкеліс жолының бойындағы тозу белгілері мен микро сызаттары

Тозу жолының морфологиясын талдау нәтижелері барлық үлгілерде абразивті тозуға тән микросызаттардың бар екені байқалды. Бұл фазалық құрамның өзгеруімен емес, алдын ала қыздыру кезінде жабын құрылымының тығыздалуы, кеуектіліктің төмендеуі және карбид фазасының NiCr матрицасымен өзара әрекеттесуінің жақсаруы сияқты микроструктуралық факторлармен байланысты болуы мүмкін.

Рентгендік дифракциялық талдау нәтижелері барлық зерттелген температуралық режимдерде Cr_3C_2 –NiCr жүйесінің сақталатынын және алдын ала қыздырудың фазалық құрамға айтарлықтай әсер етпейтінін көрсетеді. Осыған байланысты трибологиялық қасиеттердегі байқалған айырмашылықтар жабынның микроструктуралық күйімен және механикалық сипаттамаларымен анықталатынын айтуға болады. Жалпы алғанда, алынған нәтижелер Cr_3C_2 –NiCr жабындарының тозуға төзімді механикалық қорғаныш қабаты ретінде қолдануға болатынын көрсетеді.

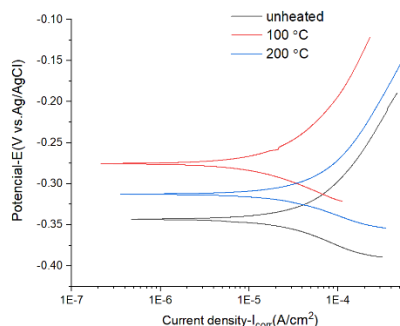
HVOF әдісімен алынған жабындардың жоғары коррозияға төзімділігі олардың төмен кеуектілігімен және тығыз құрылымымен түсіндіріледі [22]. Кеуектер санының азаюы электролиттің жабынның ішкі қабаттарына өтуін шектеп, коррозия қарқындылығын төмендетеді. 3-кесте мәліметтері бойынша, 100°C температурада алдын ала қыздырылған үлгіде коррозиялық ток тығыздығының ең төмен мәні анықталды. Бұл осы режимде қалыптасқан жабынның коррозиялық ортада тұрақтылығы жоғары екенін және оның құрылымы салыстырмалы түрде тығыз болғанын көрсетеді.

Кесте 3 – Үлгілердің коррозиялық сынақ нәтижелері

Үлгі	Коррозия тоғының тығыздығы I_k , мкА/см ²	Еркін коррозия потенциалы E_k , V
0°C	6,5968E-05	-0,34321
100°C	3,3016E-05	-0,27552
200°C	6,7805E-05	-0,3127

Сонымен қатар, беткі кедір-бұдырлықтың R_a мәнінің төмен болуы да жабын бетінің тегіс әрі тығыз қалыптасқан, нәтижесінде коррозиялық орта мен жабын арасындағы жанасу аймағы азайып, коррозия жылдамдығы төмендейді. 7-суретте көрсетілген Тафель қисықтары бұл тәуелділікті көрсетеді. Жабындардың электрохимиялық мінез-құлқы коррозиялық потенциалдың және коррозиялық ток тығыздығының өзгеруімен сипатталады, ал ең қолайлы нәтижелер 100°C температурада алдын ала қыздырылған үлгіде байқалады.

Жоғары жылдамдықты оттекті – отын жалынды бүрку әдісінде ұнтақ беру жылдамдығы мен ұнтақ–негіз арасындағы қашықтық бөлшектердің температурасына және қату кинетикасына әсер етіп, жабынның кеуектілігі мен тығыздығын анықтайды. Қыздырылмаған үлгімен және 200°C температурада алдын ала қыздырылған үлгімен жүргізілген зерттеулер көрсеткендей, жұмыс барысында бүрку қашықтығы 400 мм және ұнтақ беру жылдамдығы 60 г/мин болған жағдайда 200°C-та алдын ала қыздыру кезінде жабынның кеуектілігі салыстырмалы түрде жоғарылап, тығыздығы төмендегені байқалды [24-27].



Сурет 7 – Алынған жабындардың электрохимиялық коррозиясын өлшеу нәтижелерінің диаграммасы

Қортынды

Жүргізілген зерттеу нәтижелері HVOF әдісімен қалыптастырылған $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{--NiCr}$ жабындары 12X1МФ тот баспайтын болатының тозуға және коррозияға төзімділігі артатыны байқалды. СЭМ зерттеулері барлық температуралық режимдерде алынған жабындардың негізбен жақсы байланысқанын және төмен кеуектілікпен сипатталатынын көрсетті. Алдын ала қыздыру үлгілерде жабын құрылымының тығыздығы артып, беткі кедір-бұдырлықтың төмендеуі байқалды. Рентгендік дифракциялық талдау нәтижелері зерттелген температуралық режимдерде $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{--NiCr}$ жүйесінің фазалық тұрақтылығы сақталатынын және алдын ала қыздырудың фазалық құрамға теріс әсер етпейтінін растады. Механикалық және трибологиялық сынақтар 100°C температурада алдын ала қыздырылған үлгілердің ең қолайлы қасиеттер жиынтығын көрсететінін анықтады. Бұл жағдайда микроқаттылықтың жоғары мәні (897,8 HV), беткі кедір-бұдырлықтың төмендеуі, тозу ізінің диаметрінің минималды мәні (712 мкм) және коррозиялық ток тығыздығының төмендеуі тіркелді.

Жалпы алғанда, алынған нәтижелер HVOF әдісімен алынған $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{--NiCr}$ жабындарының жоғары температуралы және агрессивті ортада жұмыс істейтін 12X1МФ тот баспайтын болаттан жасалған қазандық құбырлары үшін тозуға және коррозияға төзімді тиімді қорғаныш қабаты ретінде қолдануға болатынын көрсетеді.

Әдебиеттер тізімі

1. Erosive wear caused by large solid particles carried by a flowing liquid: A comprehensive review / C. Kang et al // *Processes*. – 2024. – № 12(6). – P. 1150.
2. Ibrahim A.O. Boiler Water Chemistry: A Critical Mechanism for Boiler Tube Failure / A.O. Ibrahim, O.O. Ighodaro, M.A. Waheed // *Journal of Energy Technology and Environment*. – 2025. – № 7(1). – P. 128-133.
3. Slagging characteristics of a steam boiler furnace with flare combustion of solid fuel when switching to composite slurry fuel / D. Glushkov et al // *Applied Sciences*. – 2022. – № 13(1). – P. 434.
4. Li B. CFD investigation of slagging on a super-heater tube in a kraft recovery boiler / B. Li, A. Brink, M. Hupa // *Fuel processing technology*. – 2013. – № 105. – P. 149-153.
5. Sidhu T.S. State of the art of HVOF coating investigations – A review / T.S. Sidhu, S. Prakash, R.D. Agrawal // *Marine Technology Society Journal*. – 2005. – № 39(2). – P. 53-64.
6. Poirier D. Engineering HVOF-sprayed $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{--NiCr}$ coatings: the effect of particle morphology and spraying parameters on the microstructure, properties, and high temperature wear performance / D. Poirier, J.G. Legoux, R.S. Lima // *Journal of thermal spray technology*. – 2013. – № 22(2). – P. 280-289.
7. Mechanical properties optimization of $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{--NiCr}$ coatings produced by compact plasma spray process / F. Rubino et al // *Surface and Coatings Technology*, 2023. – № 465. – P. 129570.

8. Review of Physical and Mechanical Properties, Morphology, and Phase Structure in Cr₃C₂-NiCr Composite Coatings Sprayed by HVOF Method / B. Seitov et al // Coatings. – 2025. – № 15(4). – P. 479.
9. GOST 20072-74. Stal' teploustojchivaya. Tehnicheskie usloviya. – Vved. 01.01.1976. – M.: Izd-vo standartov, 1976. – 12 s. (In Russian).
10. The bonding formation during thermal spraying of ceramic coatings: a review / C.J. Li et al // Journal of Thermal Spray Technology. – 2022. – № 31(4). – P. 780-817.
11. Study of compressed air pressure on the properties of coatings obtained by supersonic metallization / B. Rakhadilov et al // Journal of Theoretical and Applied Physics. – 2024. – № 18(6).
12. An influence of oxygen flow rate and spray distance on the porosity of HVOF coating and its effects on corrosion – a review / A. Raza et al // Materials. – 2022. – № 15(18). – P. 6329.
13. Ogunmola O. Microstructure, Mechanical, and Tribological Evaluation of Carbide-Based Wear-Resistant Coatings for Aerospace Applications (Doctoral dissertation, Concordia University). – 2024.
14. Influence of Vacuum Heat Treatment on the Residual Stress of Thermal Spray Cermet Coatings / R. Ahmed et al // In World Congress on Engineering. – 2007. – P. 1181-1186.
15. Ksiazek M. Microstructure, Tribological, and Corrosion Behaviour of HVOF-Sprayed (Cr₃C₂-NiCr+ Ni) Coatings on Ductile Cast Iron / M. Ksiazek, L. Boron. – 2025.
16. Influence of thickness and surface roughness on impact wear and impact lifetime of HVOF-sprayed coatings / J. Daniel et al // Surface and Coatings Technology. – 2024. – № 488. – P. 131058.
17. The influence of heat treatment on tribological and mechanical properties of HVOF sprayed CrC–NiCr coatings / J.A. Picas et al // Microstructure and selected properties of Cr₃C₂–NiCr coatings obtained by HVOF on magnesium alloy substrates. Materials. – 2020. – № 13(12). – P. 2775.
18. Thermal stability of nanostructured Cr₃C₂-NiCr coatings / J. He et al // Journal of thermal spray technology. – 2001. – № 10(2). – P. 293-300.
19. Effect of stoichiometry conditions on the erosion and sliding wear behaviors of Cr₃C₂-NiCr coatings deposited by a novel ethanol-fueled HVOF process / S. Liu et al // Surface and Coatings Technology. – 2023. – № 454. – P. 129084.
20. Impact wear performances of Cr₃C₂ NiCr coatings by plasma and HVOF spraying / X.M. Li et al // Wear. – 1997. – № 202(2). – P. 208-214.
21. Effect of Structure Density of Milled Powder on Hot Corrosion and Erosion Resistance of HVOF-Sprayed Cr₃C₂-NiCr Coating / S. Ramandhany et al // Journal of Thermal Spray Technology. – 2024. – № 33(4). – P. 1075-1099.
22. Influences of sand concentration and flow velocity on hydro-abrasive erosion behaviors of HVOF sprayed Cr₃C₂-NiCr and WC–Cr₃C₂-Ni coatings / S. Hong et al // Journal of Materials Research and Technology. – 2022. – № 21. – P. 1507-1518.
23. Jia L. Design and analysis of a low-temperature oxygen-fuel spray system / L. Jia. – 2007.
24. Jackson K.A. Kinetics of solidification / K.A. Jackson, B. Chalmers // Canadian Journal of Physics. – 1956. – № 34(5). – P. 473-490.
25. The effect of HVOF spray distance on solid particle erosion resistance of WC-based cermets bonded by Co, Co-Cr and Ni deposited on mg-alloy substrate / E. Jonda et al // Advances in Science and Technology. Research Journal. – 2024. – № 18(2).
26. Identifying the optimal HVOF spray parameters to attain minimum porosity and maximum hardness in iron based amorphous metallic coatings / S. Vignesh et al // Defence technology. – 2017. – № 13(2). – P. 101-110.

Қаржыландыру

Бұл зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті тарапынан қаржыландырылды (грант № BR24992870).

Д.А. Әскержанов^{1,2*}, Р.К. Кусаинов^{1,2}, А.Ж. Жасұлан^{1,2}, К.Д. Орманбеков¹, А.Б. Шынарбек¹

¹Шәкәрім университет, Инжиниринговый центр,
071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20 А

²Шәкәрім университет,
071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20 А

*e-mail: dumanaskerzhanov541@gmail.com

СТРУКТУРНЫЕ, ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ И КОРРОЗИОННЫЕ СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ Cr₃C₂-NiCr, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ HVOF

Данное исследование направлено на повышение срока службы котельных труб из стали 12Х1МФ, применяемых на тепловых электростанциях. Покрытия $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{--NiCr}$ были получены методом высокоскоростного кислородно-топливного напыления (HVOF), после чего изучены их структурно-фазовые, механические, трибологические и коррозионные свойства. Установлено, что предварительный нагрев образцов при различных температурах (без нагрева, 100°C и 200°C) оказывает существенное влияние на морфологию, пористость и механические характеристики покрытий. Результаты СЭМ-анализа показали низкую пористость покрытий, тогда как данные рентгеноструктурного анализа подтвердили стабильность фазы Cr_3C_2 и способность матрицы NiCr эффективно удерживать карбидные частицы. Это препятствует разрушению покрытия и обеспечивает фазовую стабильность при повышенных температурах. Наилучшие результаты были получены для покрытий, сформированных при температуре предварительного нагрева 100°C: твердость увеличилась до 897,8 HV, снизилась шероховатость поверхности, стабилизировался коэффициент трения, а диаметр износового следа достиг минимального значения (712 мкм). Кроме того, отмечено снижение скорости коррозии. В целом полученные результаты свидетельствуют о высокой эффективности покрытий $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{--NiCr}$ в качестве защитного слоя с повышенной прочностью, износо- и коррозионной стойкостью, что делает их перспективными для применения в высокотемпературных агрессивных средах.

Ключевые слова: высокоскоростное кислородно-топливное напыление (HVOF), сталь 12Х1МФ, коррозия, трибология, шероховатость поверхности, твердость.

D.A. Askerzhanov^{1,*}, R.K. Kussainov^{1,2}, A.Zh. Zhassulan^{1,2}, K.D. Ormanbekov¹, A.B. Shynarbek¹

¹Shakarim University, Engineering Center,
071412, Republic of Kazakhstan, Semey, 20A Glinka St.

²Shakarim University,
071412, Republic of Kazakhstan, Semey, 20A Glinka St.

*e-mail: dumanaskerzhanov541@gmail.com

STRUCTURAL, TRIBOLOGICAL, AND CORROSION PROPERTIES OF $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{--NiCr}$ COATINGS DEPOSITED BY THE HVOF METHOD

This study is aimed at extending the service life of 12Kh1MF steel boiler tubes used in thermal power plants. $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{--NiCr}$ coatings were deposited by the high-velocity oxygen–fuel (HVOF) spraying method, and their structural–phase, mechanical, tribological, and corrosion properties were investigated. It was found that preheating the substrates at different temperatures (without preheating, 100 °C, and 200 °C) significantly affects the coating morphology, porosity, and mechanical characteristics. SEM analysis revealed that the coatings exhibit low porosity, while XRD results confirmed the stability of the Cr_3C_2 phase and the ability of the NiCr matrix to effectively bind the carbide particles. This prevents coating spallation and ensures phase stability at elevated temperatures. The coatings obtained at a preheating temperature of 100 °C demonstrated the best overall performance: hardness increased up to 897.8 HV, surface roughness decreased, the coefficient of friction stabilized, and the wear track diameter reached its minimum value (712 μm). In addition, a reduced corrosion rate was observed. Overall, the results demonstrate that $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{--NiCr}$ coatings are effective protective layers with high strength, wear resistance, and corrosion resistance, making them suitable for application in high-temperature aggressive environments.

Key words: high-velocity oxygen–fuel (HVOF) spraying, 12Kh1MF steel, corrosion, tribology, surface roughness, hardness.

Авторлар туралы мәліметтер

Думан Аңсағанұлы Әскержанов* – «Техникалық физика» мамандығының магистранты, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы, Инжиниринг орталықтың ғылыми қызметкері; e-mail: dumanaskerzhanov541@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3706-4087>.

Ринат Кенжеевич Кусаинов – Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы, Инжиниринг орталықтың жетекшісі; e-mail: rinat.k.kus@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5166-4761>.

Айнұр Жасұланқызы Жасұлан – «Техникалық физика» мамандығының докторанты, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы, Инжиниринг орталықтың аға ғылыми қызметкері; e-mail: ainur.99.99.99@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5887-0135>.

Куаныш Даулетович Орманбеков – «Технологиялық машиналар мен жабдықтар» мамандығының докторанты, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы, Инжиниринг орталықтың «Материалдар бетін өңдеудің плазмалық технологиялары» зертханасының меңгерушісі; e-mail: kuanyshe.dauletson@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6099-2812>.

Айбек Бақытжанұлы Шынарбек – «Технологиялық машиналар мен жабдықтар» мамандығының докторанты, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы, Инжиниринг орталықтың «Материалтану және материалдар беттерін модификациялаудың электролиттік-плазмалық технологиялары» зертханасының меңгерушісі; e-mail: shinarbekov16@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-2877-5178>.

Сведения об авторах

Думан Ансаганулы Әскержанов* – магистрант по специальности «Техническая физика», Шәкәрім университет, Республика Казахстан, научный сотрудник Инжинирингового центра; e-mail: dumanaskerzhanov541@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3706-4087>.

Ринат Кенжеевич Кусаинов – Шәкәрім университет, Республика Казахстан, руководитель Инжинирингового центра; e-mail: rinat.k.kus@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5166-4761>.

Айнур Жасуланкызы Жасулан – докторант по специальности «Техническая физика», Шәкәрім университет, Республика Казахстан, старший научный сотрудник Инжинирингового центра; e-mail: ainur.99.99.99@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5887-0135>.

Куаныш Даулетович Орманбеков – докторант по специальности «Технологические машины и оборудование», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; заведующий лабораторией «Плазменные технологии обработки поверхности материалов» Инжинирингового центра; e-mail: kuanyshe.dauletson@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6099-2812>.

Айбек Бакытжанулы Шынарбек – докторант по специальности «Технологические машины и оборудование», Шәкәрім университет, Республика Казахстан, заведующий лабораторией «Электролитно-плазменные технологии модификации поверхности материалов и материаловедения» Инжинирингового центра; e-mail: shinarbekov16@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-2877-5178>.

Information about the Authors

Duman Ansaganuly Askerzhanov* – Master's student in Technical Physics, Shakarim University, Republic of Kazakhstan, Research Fellow at the Engineering Center; e-mail: dumanaskerzhanov541@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3706-4087>.

Rinat Kenzheevich Kusainov – Shakarim University, Republic of Kazakhstan; Head of the Engineering Center; e-mail: rinat.k.kus@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5166-4761>.

Ainur Zhassulankyzy Zhassulan – PhD student in Technical Physics, Shakarim University, Republic of Kazakhstan, Senior Research Fellow at the Engineering Center; e-mail: ainur.99.99.99@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5887-0135>.

Kuanyshe Dauletovich Ormanbekov – PhD student in Technological Machines and Equipment, Shakarim University, Republic of Kazakhstan, Head of the Plasma Technologies for Materials Surface Treatment Laboratory at the Engineering Center; e-mail: kuanyshe.dauletson@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6099-2812>.

Aibek Bakytzhanuly Shynarbek – PhD student in Technological Machines and Equipment, Shakarim University, Republic of Kazakhstan; Head of the Electrolytic – Plasma Technologies for Materials Surface Modification and Materials Science Laboratory at the Engineering Center; e-mail: shinarbekov16@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-2877-5178>.

Редакцияға енуі 05.01.2026

Өңдеуден кейін түсуі 11.03.2026

Жариялауға қабылданды 12.03.2026

[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1\(21\)-64](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-64)

МРНТИ: 44.31.31



Н.Т. Рустамов¹, О.Д. Меирбекова^{1*}, Н.Б. Мухамеджанов¹, А.Н. Бергузинов²

¹Международный казахско-турецкий университет имени Ходжи Ахмеда Ясави, 160400, Республика Казахстан г. Туркестан, ул. Б.Саттарханова 29

²Торайгыров университет, 140000, Республика Казахстан г. Павлодар, ул. Ломова, 64

*e-mail: oksana_120183@mail.ru

ЛОКАЛЬНАЯ ФРАКТАЛЬНАЯ СОЛНЕЧНАЯ ТЕПЛОВАЯ СТАНЦИЯ

Аннотация: В данной работе предлагается новый тип фрактальной солнечной тепловой станции (ФСТС), основанной на использовании фрактального солнечного коллектора с модульной архитектурой. Разрабатываемая ФСТС ориентирована на обеспечение локальных потребителей тепловой энергией в автономных и удалённых районах, а также для объектов с ограниченной площадью размещения. Особенностью конструкции является применение фрактальных

©Н.Т. Рустамов, О.Д. Меирбекова, Н.Б. Мухамеджанов, А.Н. Бергузинов, 2026