

Торайғыров университетінің хабаршысы  
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ  
Вестник Торайғыров университета

---

# Торайғыров университетінің ХАБАРШЫСЫ

Энергетикалық сериясы  
1997 жылдан бастап шығады



## ВЕСТНИК Торайғыров университета

Энергетическая серия  
Издается с 1997 года

ISSN 2710-3420

---

№ 4 (2023)

ПАВЛОДАР

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ**  
**Вестник Торайгыров университета**

**Энергетическая серия**  
выходит 4 раза в год

---

**СВИДЕТЕЛЬСТВО**

о постановке на переучет периодического печатного издания,  
информационного агентства и сетевого издания

№ 14310-Ж

выдано

Министерство информации и общественного развития  
Республики Казахстан

**Тематическая направленность**

публикация материалов в области электроэнергетики,  
электротехнологии, автоматизации, автоматизированных и  
информационных систем, электромеханики и теплоэнергетики

**Подписной индекс – 76136**

---

<https://doi.org/10.48081/SMUR2431>

**Бас редакторы – главный редактор**

Кислов А. П.  
*к.т.н., доцент*

Заместитель главного редактора

Талипов О. М., *доктор PhD*

Ответственный секретарь

Калтаев А.Г., *доктор PhD*

**Редакция алқасы – Редакционная коллегия**

Клецель М. Я., *д.т.н., профессор*  
Новожилов А. Н., *д.т.н., профессор*  
Никитин К. И., *д.т.н., профессор (Россия)*  
Никифоров А. С., *д.т.н., профессор*  
Новожилов Т. А., *д.т.н., профессор*  
Алиферов А.И., *д.т.н., профессор (Россия)*  
Кошеков К.Т., *д.т.н., профессор*  
Приходько Е.В., *к.т.н., профессор*  
Оспанова Н. Н., *к.п.н., доцент*  
Нефтисов А. В., *доктор PhD*  
Омарова А.Р., *технический редактор*

---

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели  
Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов  
При использовании материалов журнала ссылка на «Вестник Торайгыров университета» обязательна

© Торайгыров университет

<https://doi.org/10.48081/WOTP6032>

**\*М. Маулет<sup>1</sup>, В. Велеба<sup>2</sup>, Б. К. Рахадиллов<sup>3</sup>,  
Ж. Б. Сағдолдина<sup>4</sup>, Н. С. Райсов<sup>5</sup>**

<sup>1,2,3,4,5</sup>С. Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті,  
Қазақстан Республикасы, Өскемен қ;

<sup>2</sup>Вроцлав техникалық университеті, Польша, Вроцлав қ;

<sup>3</sup>«PlasmaScience» ЖШС, Қазақстан Республикасы, Өскемен қ.

\*e-mail: [maulet\\_meruert@mail.ru](mailto:maulet_meruert@mail.ru)

## **12Х1МФ ЫСТЫҚҚА ТӨЗІМДІ ҚАЗАНДЫҚ БОЛАТЫНЫҢ БЕТІНЕ АЛЫНҒАН Ni-Cr-Al НЕГІЗІНДЕГІ ЫСТЫҚҚА ТӨЗІМДІ ЖАБЫНДАРЫНЫҢ ЖОҒАРЫ ТЕМПЕРАТУРАЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІ**

*Бұл мақалада детонациялық бұрку әдісімен 12Х1МФ ыстыққа төзімді қазандық болатының бетіне алынған Ni-Cr-Al негізіндегі біртекті және градиентті жабындарының жоғары температуралық тотығу қасиеттері зерттелді. Ni-Cr-Al негізіндегі біртекті және градиентті жабындарының жоғары температуралық тотығуға төзімділігін бағалау үшін 1000 °С температура да циклдік сынақтар жүргізілді. Жоғары температуралық тотығу қабілетін бағалау әр циклден кейін үлгілер массасының өсуін өлшеу арқылы жүргізілді. Сонымен қатар жабындардың жоғары температуралық тотығуға дейінгі кезектілігі өлшеніп, тотығудан кейін рентген құрылымдық фазалық талдау (XRD) жүргізілді. Визуалдық талдау нәтижелері бойынша Ni-Cr-Al біртекті және градиентті жабындары бар үлгілердің беті жабынсыз 12Х1МФ қазандық болаты үлгісімен салыстырғанда зақымдалмағанын көрсетті. Жабынсыз 12Х1МФ болаты үшін тотығу және массаның ұлаю процесі үздіксіз жүреді, салмақтың өсуі барлық сыналған үлгілердің ішіндегі ең жоғарысы болып табылады. Рентген фазалық талдауы нәтижесінде циклдік жоғары температуралық тотығудан кейін жабындардың бетінде Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> және Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> сияқты қорғаныш оксидтерінің түзілгенін көрсетті. Сонымен қатар Ni-Cr-Al негізіндегі градиентті жабынындағы Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> фазасының шыңдары Ni-Cr-Al негізіндегі біртекті жабынымен*

*салыстырғанда айқынырақ және қарқынды, бұл өз кезегінде градиентті жабынның тотығуға төзімділігін арттыруға ықпал етеді.*

*Кілтті сөздер: жоғары температуралы тотығу, 12X1МФ қазандық болаты, градиентті жабын, Ni-Cr-Al жабыны, детонациялық бүрку.*

## **Кіріспе**

Жылу электр станцияларында ұшпа күл мен жанбаған көміртегі бөлшектерінің әсерінен болатын жоғары температураның тотығуы және эрозия сияқты күрделі мәселелер туындайды. Бұл процестер бу қазандығының құрамдас бөліктеріне зақым келтіруі мүмкін, демек, бу қазандықтарының ішіндегі зақымдалған құбырлар мен басқа элементтерді ауыстыруды қоса алғанда, техникалық қызмет көрсету шығындарының артуы да мүмкін. Осыған байланысты жылу қазандықтарының компоненттерінің тозуын және жоғары температуралы тотығуын болдырмайтын арнайы қорғаныс жабындарын жасау осы сала үшін техникалық және экономикалық тұрғыдан маңызды болып табылады. Бұл қорғаныс жабындары компоненттердің қызмет ету мерзімін ұзартуға, техникалық қызмет көрсету шығындарын азайтуға және жылу электр станцияларының тиімділігі мен қауіпсіздігін арттыруға мүмкіндік береді [1–2].

NiCrAl жабындары жоғары температурада, тотығуда және ыстық коррозияда жұмыс істейтін компоненттерді қорғайтын термиялық тосқауыл жабындары (ТВС) ретінде кеңінен қолданылады [3]. Әдетте ТВС жабындарында алюминийдің мөлшері шектеулі және оның жеткіліксіз мөлшері NiCrAl жабындарының сапасының нашарлауының негізгі себебі болып табылады. Жоғары температуралы коррозияның бастапқы кезеңдерінде  $Al_2O_3$  және  $Cr_2O_3$  оксидтерінің түзілуі, сондай-ақ сынақ процесінде аралас  $Cr_2O_3-Al_2O_3$  оксидінің түзілуі жабындардың жоғары температуралы коррозияға және тотығуға төзімділігін арттыратыны байқалды [4–5]. Соңғы кездері градиент құрылымы бар NiCrAl жабындарына баса назар аударылды [6–8].

Біздің алдыңғы жұмысымызда [9] детонациялық бүрку әдісі арқылы Ni-Cr-Al негізіндегі градиентті жабынды алу әдісі ұсынылды. Бұл жұмыстың негізгі мақсаты детонациялық бүрку әдісімен 12X1МФ қазандық болатының бетіне алынған Ni-Cr-Al негізіндегі біртекті және градиентті термиялық төзімді жабындардың жоғары температуралық қасиеттерін зерттеу болып табылады.

## **Материалдар мен әдістері**

Ni-Cr-Al негізіндегі біртекті және градиентті жабындарды алу үшін субстрат ретінде 12X1МФ төмен легирленген ыстыққа төзімді қазандық

болаты таңдалды. Болаттың химиялық құрамы МЕМСТ 20072 сәйкес 1-кестеде келтірілген. Үлгілер 15x15x3мм өлшемде кесілді. Субстрат беттері біркелкі және тегіс бетке жету үшін MIRKA тегістеу қағазын пайдаланып барлық алты жағынан тегістеліп, алты жағынан құммен өңделді.

Кесте 1 – 12Х1МФ болатының химиялық құрамы.

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Mo	V	Cu
0.1–0.15	0.17–0.37	0.4–0.7	to 0.3	to 0.025	to 0.03	0.9–1.2	0.25–0.35	0.15–0.3	to 0.2

Жабын алу үшін Ni-Cr-Al композиттік ұнтағы 80 мас. % NiCr ұнтағы ( $Ni_2^0Cr_80$ ) және 20 мас. % Al (тазалығы 99,99 %) қатынасында дайындалды. Ұнтақ қоспасын алдын ала белсендіру үшін PULVERISETTE23 планеталық шар диірмені пайдаланылды. Механикалық белсендіру уақыты 30 Гц жиілікте 2 сағатты құрады.

Жабын CCDS2000 детонациялық қондырғысында алынды [10-11]. Жарылғыш газ ретінде  $O_2/C_2H_2 = 1,856$  оттегі-ацетилен қоспалары қолданылды. Оқпан көлемін жарылғыш газбен 50 % толтырып Ni-Cr-Al негізіндегі біртекті жабыны алынды. Ал Ni-Cr-Al негізіндегі градиентті жабын оқпанды жарылғыш газбен толтыру көлемін 50 %–дан 25 %–ға дейін біртіндеп азайту арқылы алынды. Ni-Cr-Al негізіндегі градиентті жабынын алу әдісі біздің бұрын жарияланған жұмысымызда егжей-тегжейлі сипатталған [9]. Ni-Cr-Al біркелкі және градиентті жабындары субстраттың барлық алты жағына жағылды. 2-кестеде Ni-Cr-Al негізіндегі біртекті және градиентті жабындарды алу режимдері берілген [12].

Кесте 1 – Ni-Cr-Al негізіндегі біртекті және градиентті жабындарын алу режимдері [12]

Аты	$O_2/C_2H_2$	Оқпан толтыру көлемі, %	Б ү р к у кашықтығы, мм	Ату саны
Ni-Cr-Al біртекті жабыны	1.856	50%	250	20
Ni-Cr-Al градиентті жабыны	1.856	50%	250	5
		40%		5
		30%		5
		25%		5

Үш түрі үлгі жоғары температуралы циклдік тотығу сыналды: жабынсыз 12Х1МФ ыстыққа төзімді қазандық болаты және Ni-Cr-Al негізіндегі біртекті және градиентті жабындары алынған 12Х1МФ ыстыққа төзімді қазандық болаты. Циклдік жоғары температуралық тотығу сынағы атмосфералық

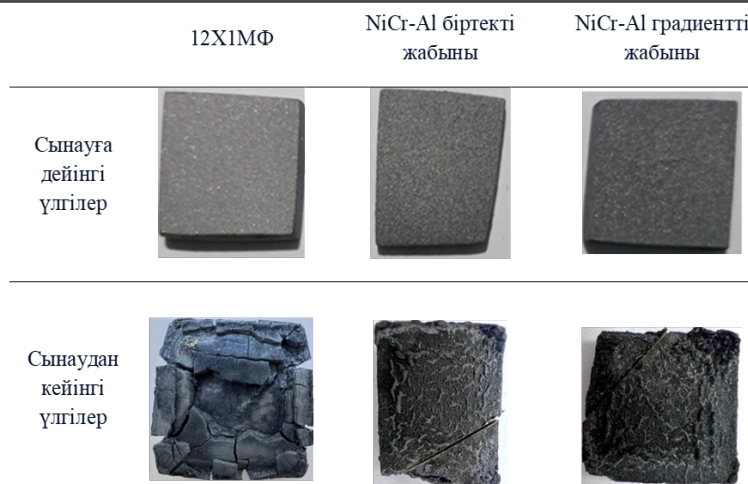
қысым кезінде статикалық ауада 1000 °С температурада жүргізілді. Үш үлгі бір уақытта сыналды. Үлгілер 2500 °С-қа дейін температураға шыдайтын ыстыққа төзімді тигельге орналастырылды. Сынақ керамикалық камерасы бар SNOL 7.2/1100 муфель пешінде жүргізілді. Сынақтарды бастамас бұрын үлгілер суретке түсіріліп, салмағы өлшенді. Әр сағат сайын үлгілер ауада 20 минут салқындатылып, салмағы өлшенді (1 цикл). Бұл цикл 25 рет қайталанды. Үлгілердің массасының өсуін өлшеу арқылы олардың жоғары температуралық тотығу қабілеті бағаланды.

Жоғары температуралы тотығуға сынағаннан кейін жабын бетінде қалыптасқан фазаларды анықтау үшін X>PertPRO дифрактометрін қолдана отырып рентген құрылымдық фазалық талдау (XRD) жүргізілді. Жабындардағы кеуектілік арнайы Altami Studio 1.5 бағдарламасын қолдана отырып, РЭМ суреттерінде анықталды.

### **Нәтижелер және талқылау**

Жоғары температуралы циклдік тотығу сынағы алдында жабындардың кеуектілігі өлшенді. Ni-Cr-Al негізіндегі біртекті және градиентті жабындарының кеуектілігі шамамен 1 % құрады. Бала N. және т.б. жұмысында жабын кеуектілігінің 1-ден 3,5 %-ға дейінгі диапазонда болуы тотығуға төзімділікке оң әсер етеді деп хабарлайды [13].

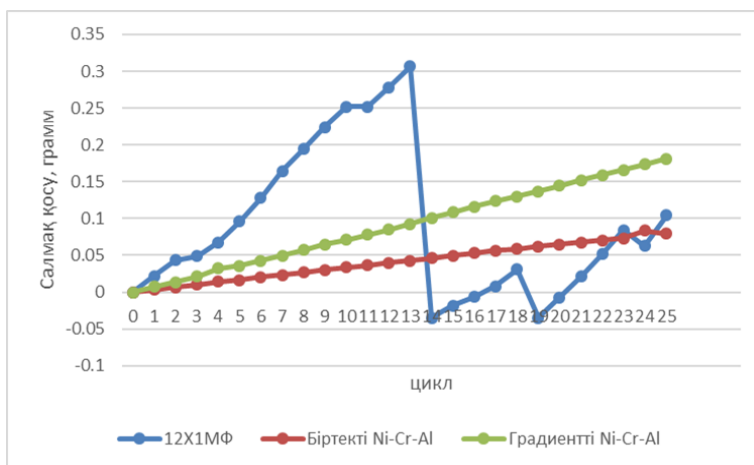
1-суретте жоғары температуралы циклдік тотығу сынағына дейінгі және 25 циклдік сынақтан кейінгі үлгілер көрсетілген. Сынаққа дейін Ni-Cr-Al негізіндегі біртекті жабынының беті тегіс сұр түсті, ал градиентті жабынының беті қара сұр түсті болды. Жоғары температуралы 25 циклдік тотығу сынағынан кейін жабынсыз 12X1МФ ыстыққа төзімді қазандық болаты шеттерінде қара дақтар пайда болып, зақымданып, жарыла бастады. Ал Ni-Cr-Al негізіндегі біртекті және градиентті жабынды үлгілер зақымға ұшырамаған және шеттерінде оксидтер түзіле бастады.



Сурет 1 – Жоғары температуралы циклдік тотығу сынағына дейінгі және 25 циклдік сынақтан кейінгі үлгілер

2-суретте жоғары температуралы циклдік тотығуға сынақтар жүргізу нәтижесінде жабынсыз 12X1МФ, сондай-ақ Ni-Cr-Al жабыны бар үлгілердің массасының өзгеруі көрсетілген. Жабынсыз 12X1МФ болаты үшін тотығу және массаның ұлғаю процесі үздіксіз жүреді, салмақтың өсуі барлық сыналған үлгілердің ішіндегі ең жоғарысы болып табылады. Үлгінің шеттері мен бұрыштарында шығынаулар байқалды, ал 14-ші, 18-ші, 24-ші циклдарда үлгі қабыршақтана бастады. Осылайша, 2-суреттен 12X1МФ болатының массасының бір бөлігін жоғалтқанын көруге болады. Ni-Cr-Al біртекті және градиентті жабындары бар үлгілер 2-ші циклден кейін массаның шамалы өсуін көрсетті және бұл өсім 25-ші цикл аяқталғанға дейін жалғасты. Ni-Cr-Al біртекті жабыны бар үлгі Ni-Cr-Al градиентті жабынды үлгіге қарағанда массаның аз өсуін көрсетті. Мұны келесідей түсіндіруге болады: Ni-Cr-Al біртекті және градиентті жабынды үлгілердің бетінде пайда болған  $Al_2O_3$  пленкасы одан әрі тотығуды болдырмау және массаның өсуін азайту үшін жеткілікті тұрақты болды. Алайда, Ni-Cr-Al біртекті жабынының бетіндегі алюминий мөлшері азайып,  $NiCr_2O_4$ , NiO сияқты жеңіл оксидтердің пайда болуына әкелді. Ni-Cr-Al градиентті жабындары бар үлгілердің бетінде алюминий оксиді де, жеңіл аралас  $Cr_2O_3$ ,  $NiCr_2O_4$ , NiO оксидтері де пайда болды. Бұл рентгендік фазалық талдаумен расталады (3-сурет). Визуалдық бақылауда да градиентті жабынының бетінде көбірек оксидтер пайда

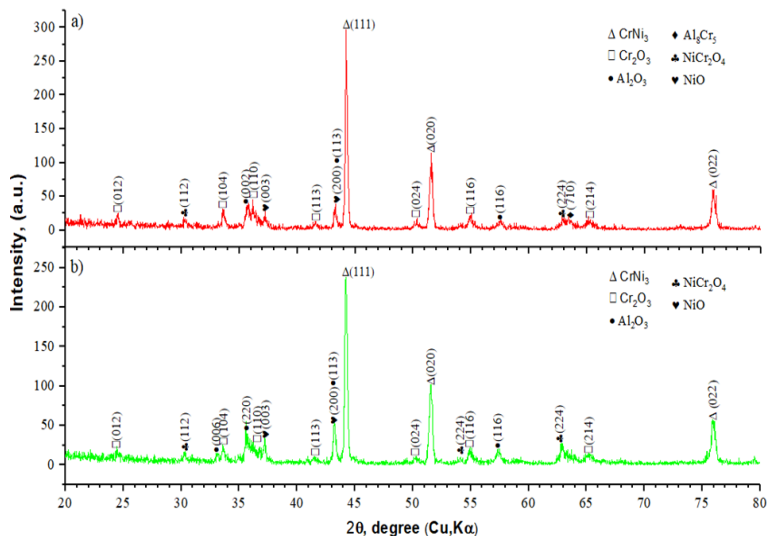
болғанын көрсетеді (1-сурет). Осылайша, Ni-Cr-Al біртекті және градиентті жабындары бар үлгілердегі массаның өсуі әртүрлі болды.



Сурет 2 – Жоғары температуралы циклдік тотығу сынағында үлгілер массасының өзгерісі

NiCr-Al негізіндегі жабындардың жоғары температуралы циклдік тотығуын жүргізгеннен кейін рентгендік фазалық талдау нәтижелері 3-суретте көрсетілген. Нәтижелер бойынша Ni-Cr-Al біртекті жабынының бетінде  $\text{CrNi}_3$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_8\text{Cr}_5$ ,  $\text{NiCr}_2\text{O}_4$ , NiO фазалары, ал Ni-Cr-Al градиент жабындарының бетінде  $\text{Al}_8\text{Cr}_5$  фазасынан басқа жоғарыдағы фазалардың пайда болғанын көрсетеді. Жабын бетіндегі  $\text{Al}_2\text{O}_3$  түзілуі бетке жақын алюминий мен оттегінің өзара әрекеттесуіне байланысты болуы мүмкін. Басқа оксидті қосылыстар келесідей түзіледі:  $\text{Al}_2\text{O}_3$  түзілуі тотығудың белгілі бір кезеңінде баяулайды, нәтижесінде бетінде  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  және NiO айтарлықтай мөлшері пайда болады. Осылайша,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (немесе  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) және NiO оксидтері арасындағы қатты фазалық реакциялардың арқасында  $\text{NiCr}_2\text{O}_4$  шпинелі пайда болады [14]. Сондай-ақ, рентгендік фазалық талдау нәтижелері Ni-Cr-Al градиентті жабындарындағы  $\text{Al}_2\text{O}_3$  шындығы біртекті Ni-Cr-Al жабындарымен салыстырғанда айқынырақ және қарқынды екенін көрсетті.





Сурет 3 – Жоғары температуралы циклдік тотығуды жүргізгеннен кейін рентгендік фазалық талдау нәтижелері: а) Ni-Cr-Al негізіндегі біртекті жабын, б) Ni-Cr-Al негізіндегі градиентті жабын.

### Қаржыландыру туралы ақпарат

Бұл жұмыс Қазақстан Республикасы Білім және ғылым министрлігі Ғылым комитетінің ғылыми зерттеулерін гранттық қаржыландыру шеңберінде орындалды № AP13068364.

### Қорытынды

Детонациялық бүрку әдісімен 12Х1МФ ыстыққа төзімді қазандық болатының бетіне алынған Ni-Cr-Al негізіндегі біртекті және градиентті жабындарының жоғары температуралық тотығу қасиеттері зерттеу нәтижелері бойынша келесідей тұжырымға келдік:

Визуалдық талдау нәтижелері бойынша Ni-Cr-Al біртекті және градиентті жабындары бар үлгілердің беті жабынсыз 12Х1МФ қазандық болаты үлгісімен салыстырғанда зақымдалмағанын көрсетті;

Рентген фазалық талдау нәтижелері нәтижесінде циклдік жоғары температуралық тотығудан кейін жабындардың бетінде  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  және  $\text{Al}_2\text{O}_3$  сияқты қорғаныш оксидтерінің түзілгенін көрсетті. Сонымен қатар Ni-Cr-Al негізіндегі градиентті жабынындағы  $\text{Al}_2\text{O}_3$  фазасының шыңдары Ni-Cr-Al негізіндегі біртекті жабынымен салыстырғанда айқынырақ және қарқынды, бұл өз кезегінде градиентті жабынның тотығуға төзімділігін арттыруға ықпал етеді;

Жабынсыз 12Х1МФ болаты үшін тотығу және массаның ұлғаю процесі үздіксіз жүреді, салмақтың өсуі барлық сыналған үлгілердің ішіндегі ең жоғарысы болып табылады;

12Х1МФ қазандық болатының тозуын және жоғары температуралы тотығуын болдырмайтын арнайы қорғаныс жабындарын алу оның қызмет ету мерзімін ұзартуға, техникалық қызмет көрсету шығындарын азайтуға және қауіпсіздігін арттыруға мүмкіндік береді

## ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 **Sukhjinder, S., Khushdeep, G., Rakesh, B.** A review on protection of boiler tube steels with thermal spray coatings from hot corrosion [Text] // Mater. Today: Proc. – Vol. 56. – 2022, – P. 379–383. – <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.01.219>.

2 **Kumar, S., Kumar, M., Handa, A.** Combating hot corrosion of boiler tubes –A study [Text] // Eng. Fail. Anal. – Vol.94. – 2018, – P. 379– 395. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2018.08.004>.

3 **Ghadami, F. Sabour Rouh Aghdam, A., Ghadami, S.** Microstructural characteristics and oxidation behavior of the modified MCrAlX coatings: A critical review [Text] // Vacuum. – Vol. 185. – 2021. – P. 109980. – <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2020.109980>.

4 **Mohammadi, M., Jahromi, S.A.J., Javadpour, S., Kobayashi, A., Shirvani, K.** Hot corrosion and microstructural change of Al–gradient CoNiCrAlYSi coatings, produced by LVPS and diffusional processes [Text] // Oxid. Met. – Vol. 78. – 2012. – P. 17– 30. – <http://dx.doi.org/10.1007/s11085-012-9288-4>.

5 **Mohammadi, M., Jahromi, S.A.J., Javadpour, S., Kobayashi, A.** Cyclic oxidation and hot corrosion behaviors of gradient CoNiCrAlYSi coatings, produced by HVOF and diffusional processes [Text] // Oxid. Met. – Vol. 86. – 2016. – P. 221–238. – <https://link.springer.com/article/10.1007/s11085-016-9633-0>.

6 **Guo, M.H., Wang, Q. M., Gong, J., Sun, C., Wen, L. S.** Preparation and oxidation of a gradient NiCoCrAlYSiB coating deposited by a combined system of arc ion plating and magnetron sputing [Text] // Surf. Coat. Technol. – Vol.201. – 2006. – P. 1302–1308. – <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.01.063>.

7 **Liu, X., Huang, L., Bao, Z.B., Sun, X.F., Guan, H.R., Hu, Z.Q.** Preparation and cyclic oxidation of gradient NiCrAlRe coatings on Ni– based superalloys [Text] // Surf. Coat. Technol. – Vol.202. – 2008. – P. 4709– 4713. – <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2008.04.049>.

8 **Bao, Z.B., Wang, Q.M., Li, W.Z., Liu, X., Gong, J., Xiong, T.Y., Sun, C.** Preparation and hot corrosion behaviour of an Al – gradient NiCoCrAlYSiB

coating on a Ni– base superalloy [Text] // Corros. Sci. – Vol. 51. – 2009. – P. 860– 867 <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2009.01.003>.

9 **Rakhadilov, B., Maulet, M., Abilov, M., Sagdoldina, Zh., Kozhanova, R.** Structure and tribological properties of Ni – Cr – Al based gradient coating prepared by detonation spraying [Text] // Coatings – Vol. 11. – 2021. – P. 218. – <https://doi.org/10.3390/coatings11020218>.

10 **Ulianitsky, V. Y., Dudina, D. V., Shtertser, A., Smurov, I.** Computer–controlled detonation spraying: Flexible control of the coating chemistry and microstructure [Text] // Metals – Vol. 12. – 2019. – P. 1244. – <https://doi.org/10.3390/met9121244>.

11 **Maulet, M., Rakhadilov, B.K., Sagdoldina, Z.B., Kassymov, A.B., Kakimzhanov, D.N.** Influence of the detonation – spraying mode on the phase composition and properties of Ni – Cr coatings [Text] // Eurasian J. Phys. Funct. Mater. – Vol.4. – 2020. – P. 184– 189. – <https://doi.org/10.29317/ejpfm.2020040307>.

12 **Rakhadilov, B.K., Maulet, M., Kakimzhanov, D.N., Stepanova, O.A., Botabaeva, G.B.** Comparative study of the structure and properties of homogeneous and gradient Ni – Cr – Al coatings [Text] // Eurasian J. Phys. Funct. Mater. – Vol.6(1). – 2022. – P. 47– 55. – <https://doi.org/10.32523/ejpfm.2022060105>.

13 **Bala, N., Singh, H., Prakash, S.** An overview of characterizations and high temperature behaviour of thermal spray NiCr coatings [Text] // Int. j. mater. sci. – Vol. 2(3). – 2007. – P. 201–218.

14 **W.R. Chen, X. Wu, B.R. Marple, D.R. Nagy, P.C. Patnaik / TGO** growth behaviour in TBCs with APS and HVOF bond coats [Text] // Surface and Coatings Technology. – Vol.202. – 2008 – P. 2677–2683. – <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2007.09.042>.

Басып шығаруға 28.11.23 қабылданды.

*М. Маулет<sup>1</sup>, В. Велеба<sup>2</sup>, Б. К. Рахадиллов<sup>3</sup>, Ж. Б. Сагдолдина<sup>4</sup>,  
Н. С. Райсов<sup>5</sup>*

<sup>1</sup>Восточно-Казахстанский университет имени С. Аманжолова, Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск;

<sup>2</sup>Вроцлавский технический университет, Польша, г. Вроцлав;

<sup>3</sup>«PlasmaScience», Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск.

Принято к изданию 28.11.23.

## **ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ СВОЙСТВА ТЕРМОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ Ni-Cr-Al, ПОЛУЧЕННЫХ НА ПОВЕРХНОСТИ ЖАРОПРОЧНОЙ КОТЕЛЬНОЙ СТАЛИ 12Х1МФ**

*В данной статье исследованы высокотемпературные окислительные свойства однородных и градиентных покрытий на основе Ni-Cr-Al, полученных методом детонационного напыления на поверхность термостойкой котельной стали 12Х1МФ. Для оценки устойчивости к высокотемпературному окислению однородных и градиентных покрытий на основе Ni-Cr-Al также были проведены циклические испытания температуры 10000С. Высокотемпературная окислительная способность оценивалась через измерение увеличения массы образцов после каждого цикла. Кроме того, была измерена пористость покрытий до высокотемпературного окисления, а после окисления был проведен рентгеновский структурно-фазовый анализ (XRD). По результатам визуального анализа Ni-Cr-Al показала, что поверхность образцов с однородными и градиентными покрытиями не повреждена по сравнению с образцом котельной стали 12Х1МФ без покрытия. Для стали 12Х1МФ без покрытия процесс окисления и увеличения массы происходит непрерывно, увеличение веса является самым высоким из всех протестированных образцов. Результаты рентгенофазного анализа показали, что после циклического высокотемпературного окисления на поверхности покрытий образуются защитные оксиды, такие как  $Cr_2O_3$  и  $Al_2O_3$ . Кроме того, пики фазы  $Al_2O_3$  в градиентном покрытии на основе Ni-Cr-Al более выражены и интенсивны по сравнению с однородным покрытием на основе Ni-Cr-Al, что, в свою очередь, способствует повышению устойчивости градиентного покрытия к окислению.*

*Ключевые слова: высокотемпературное окисление, котельная сталь 12Х1МФ, градиентное покрытие, покрытие Ni-Cr-Al, детонационное напыление.*

*\*M. Maulet<sup>1</sup>, W. Wieleba<sup>2</sup>, B. K. Rakhadilov<sup>3</sup>, Zh. B. Sagdoldina<sup>4</sup>,  
N. S. Raisov<sup>5</sup>*

<sup>1,2,3,4,5</sup>Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University,  
Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk.

<sup>2</sup>Wroclaw University of Science and Technology, Poland, Wroclaw;

<sup>3</sup>PlasmaScience LLP, Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk

Accepted for publication on 28.11.23

## **HIGH-TEMPERATURE PROPERTIES OF THERMAL-BARREL COATINGS BASED ON Ni-Cr-Al OBTAINED ON THE SURFACE OF HEAT-RESISTANT BOILER STEEL 12X1MF**

*In this article, the high-temperature oxidizing properties of homogeneous and gradient coatings based on Ni-Cr-Al obtained by detonation spraying on the surface of heat-resistant boiler steel 12X1MF are investigated. To assess the resistance to high-temperature oxidation of homogeneous and gradient coatings based on Ni-Cr-Al, cyclic temperature tests at 1000 °C were also carried out. The high-temperature oxidizing ability was evaluated by measuring the increase in the mass of samples after each cycle. In addition, the porosity of the coatings was measured before high-temperature oxidation, and after oxidation, X-ray structural phase analysis (XRD) was performed. According to the results of visual analysis, Ni-Cr-Al showed that the surface of the samples with homogeneous and gradient coatings is not damaged compared to the sample of boiler steel 12X1MF without coating. For 12x1mf steel without coating, the process of oxidation and increase in mass is continuous, the weight gain is the highest among all tested samples. The results of X-ray phase analysis showed that after cyclic high-temperature oxidation, protective oxides such as  $Cr_2O_3$  and  $Al_2O_3$  are formed on the surface of the coatings. In addition, the peaks of the  $Al_2O_3$  phase in a gradient coating based on Ni-Cr-Al are more pronounced and intense compared to a homogeneous coating based on Ni-Cr-Al, which, in turn, contributes to an increase in the resistance of the gradient coating to oxidation.*

*Keywords: high temperature oxidation, boiler steel 12X1MF, gradient coating, Ni-Cr-Al coating, detonation spraying.*

Теруге 28.11.2023 ж. жіберілді. Басуға 29.12.2023 ж. кол қойылды.

Электронды баспа

29.9 Мб RAM

Шартты баспа табағы 22,2. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: А. К. Мыржикова

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Тапсырыс №4175

Сдано в набор 28.11.2023 г. Подписано в печать 29.12.2023 г.

Электронное издание

29.9 Мб RAM

Усл. печ. л. 22,2. Тираж 300 экз. Цена договорная.

Компьютерная верстка: А. К. Мыржикова

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Заказ № 4175

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

67-36-69

E-mail: [kereku@tou.edu.kz](mailto:kereku@tou.edu.kz)

[www.vestnik-energy.tou.edu.kz](http://www.vestnik-energy.tou.edu.kz)