

## АННОТАЦИЯ

к диссертационной работе на соискание степени доктора философии (PhD)  
по образовательной программе «8D07103 – Теплоэнергетика»

ДАУТБЕКОВ МЕРХАТ КУРМЕТОВИЧ

«Повышение коррозионной стойкости поверхностей нагрева котлов за счет  
нанесения покрытий на основе  $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ »

**Общая характеристика работы.** Диссертационная работа посвящена получению защитных покрытий  $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$  методом детонационного напыления и исследованию их структурно-фазового состояния и трибологических свойств в зависимости от технологических режимов. В работе также представлены результаты численного моделирования температурного состояния труб котлоагрегатов и экспериментальные исследования, подтверждающие эффективность покрытий в условиях высокотемпературной эксплуатации.

**Актуальность темы.** Энергетика Казахстана в ближайшие годы останется тесно связанной с использованием угля, разведанные запасы которого составляют 34 млрд.т. (около 4 % мировых). Уголь занимает ведущее место в топливно-энергетическом балансе страны, при этом 79 % электроэнергии вырабатывается на тепловых электростанциях (ТЭС). Более половины оборудования тепловых электростанций Республики Казахстан эксплуатируется свыше 30 лет, что приводит к росту числа отказов в силу устаревания оборудования. Основными причинами отказов котлоагрегатов, являются разрушения поверхностей труб из-за нагрева, на долю которых приходится до 70 % всех повреждений. Поверхности нагрева работают в экстремальных условиях воздействия высоких температур (до 600-1200 °С), агрессивных газовых сред и абразивных частиц золы, что вызывает интенсивные процессы высокотемпературной коррозии, эрозии и термоциклического разрушения. Основной причиной деградации труб пароперегревателей, изготовленных из жаропрочных сталей (12Х1МФ, 15Х5М, 20Х3МВФ и др.), является совокупное действие окислительных и сульфидирующих процессов, протекающих на их внешней поверхности при контакте с продуктами сгорания топлива. Эти продукты содержат серу, хлор, ванадий и щелочные металлы, что приводит к ускоренному разрушению материала труб. При температурах выше 410-550 °С на их поверхности формируются рыхлые многослойные окисные плёнки, теряющие защитные свойства, что приводит к ускоренному росту коррозионных очагов и потере металла.

Одним из перспективных направлений повышения эксплуатационных характеристик и ресурса устаревшего оборудования является применение защитных композиционных покрытий на поверхностях нагрева котла. Особый интерес представляют покрытия  $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ , наносимые газотермическими методами, которые обеспечивают надёжную защиту сталей от газовой коррозии, сульфидации и окисления при температурах до 900-1000 °С.

Несмотря на многочисленные исследования теплофизических свойств жаропрочных материалов, до настоящего времени не разработана эффективная технология нанесения защитных покрытий, обеспечивающих повышение эксплуатационных характеристик поверхностей нагрева котлоагрегатов использующих непрерывное топливо. При этом, эксплуатационные свойства жаропрочных сталей, применяемых для изготовления труб, изучены достаточно подробно, тогда как процессы теплопроводности и деградации труб с защитными покрытиями остаются недостаточно изучены. Исследование в этой области представляет собой актуальную задачу, тесно связанную с повышением энергоэффективности и надёжности котельных агрегатов. В связи с этим проведение исследований, направленных на изучение теплопроводности, деградации и повышение эффективности защитных покрытий для элементов котлоагрегатов, является актуальной задачей.

**Цель диссертации:** улучшить эксплуатационные свойства поверхностей нагрева котлоагрегатов ТЭС, путём разработки и научного обоснования технологии нанесения защитных детонационных покрытий  $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$  с градиентной структурой.

**Задачи исследования:**

- разработка технологии нанесения детонационных защитных покрытий и исследование теплофизических и физико-механических свойств, структуры и характеристик полученного покрытия  $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ .
- проведение электрохимических испытаний защитных покрытий в агрессивной среде и оценка их коррозионной стойкости.
- разработка прототипа экспериментального стенда имитирующего условие работы радиационно-конвективного участка котла и получение результатов испытания на высокотемпературное окисление защитных покрытий;

**Объект исследования:** детонационные покрытия  $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$  на поверхности стали 12Х1МФ.

**Предмет исследования:** коррозионные и теплофизические характеристики поверхностей нагрева котлов с покрытиями  $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ .

**Научная новизна** заключается в следующем:

– Впервые применена математическая модель теплотехнического состояния поверхностей нагрева с детонационными покрытиями  $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ , основывающаяся на расчёте линейной плотности теплового потока через многослойную цилиндрическую стенку в сочетании с численным моделированием методом конечных элементов в программных комплексах ELCUT и SolidWorks, позволяющая количественно обосновать теплофизические свойства градиентного покрытия толщиной 100 мкм;

– Впервые разработан и экспериментально обоснован способ получения защитных детонационных покрытий  $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$  с градиентным распределением фаз путём контролируемого изменения объема заполнения ствола взрывчатой смесью (от 57 % до 73 %) при использовании одного типа порошка;

– Разработаны метод и лабораторный экспериментальный стенд на

основе стандарта ASTM G76-04 для проведения ускоренных испытаний на высокотемпературное окисление и износ, позволяющая имитировать воздействие высоких температур (до 750 °C), агрессивной среды ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) и эрозионных частиц ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), с максимальным приближением к условиям эксплуатации радиационно-конвективных поверхностей котлов.

**Связь работы с научно-исследовательскими проектами.** Тематика исследования соответствует приоритетным направлениям развития науки Республики Казахстан на 2023–2029 годы «Энергия, передовые материалы и транспорт», а также положениям Концепции развития электроэнергетической отрасли Республики Казахстан на 2023–2029 годы, направленным на повышение эффективности, экологичности и надёжности энергетических установок.

Работа была выполнена в рамках проекта AP09261164 «Повышение стойкости стальных элементов котлов теплоэлектростанции к коррозионному и эрозионному износу» по программе грантового финансирования по научным и (или) научно-техническим проектам на 2021-2023 годы (МОН РК) и проекта AP22683418 «Повышение срока службы деталей энергетического оборудования, работающих в условиях интенсивного износа, эрозии и коррозии при повышенной температуре» по программе «Жас ғалым» на 2024-2026 годы (МНВО РК).

#### **Основные научные положения, выносимые на защиту:**

- Варьирование заполнения детонационного ствола в диапазоне 57-73% позволяет формировать градиентное покрытие  $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$  с фазовым переходом от металлической пластичной матрицы ( $\text{Cr}_3\text{Ni}_2$ ,  $\text{Cr}_3\text{Ni}_2$ ) у подложки к твердой карбидной фазе на поверхности, что обеспечивает оптимальный баланс износостойкости и адгезии;

- Смещение стационарного потенциала коррозии  $E_{\text{corr}}$  в область пассивации и снижение скорости коррозии до  $0,287 \times 10^{-4}$  мм/год обеспечивает снижение коррозионных разрушений, а также стабильность (пределы механических характеристик прочности выше на 1,9-2,1%) образцов с покрытием  $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$  после 4320 часов испытаний в котле высокого давления;

- Нанесение покрытия  $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$  толщиной 100 мкм не ухудшает теплообмен (рост термосопротивления  $< 0,01\%$ ), при этом повышает надежность труб за счет снижения интенсивности отказов на 60% и обеспечивает стойкость к циклическому высокотемпературному окислению при температуре 650 °C в течение 50 циклов.

**Теоретическая значимость.** Полученные результаты математической модели для количественного обоснования теплофизического состояния многослойных котельных труб и научное обоснование метода формирования градиентных структур  $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$  путём изменения объёма заполнения детонационного ствола. Установлены фундаментальные закономерности фазовых переходов и структурных превращений в покрытиях в зависимости от технологических режимов напыления.

**Практическая значимость.** Полученные результаты могут быть

использованы для повышения эксплуатационных свойств поверхностей нагрева котлоагрегатов. Разработанная методика стендовых испытаний высокотемпературной газовой эрозии и коррозии позволяет воспроизводить условия работы радиационно-конвективного и конвективного участков котла высокого давления и может применяться для оценки эффективности защитных свойств поверхности труб. Результаты диссертационной работы с 2024 года внедрены в учебный процесс и применяются в НАО «Восточно-Казахстанский технический университет имени Даулета Серикбаева» при реализации образовательных программ 6В07103 Теплоэнергетика (курсы элективных дисциплин: «РК4306 Проектирование котельных», «ТОЕ4309 Тепломеханическое оборудование электростанций», «ТРУ4309 Теплотехнологические процессы и установки») (Акт использования в учебном процессе от 02.09.2024 г.). В рамках диссертационного исследования разработан способ нанесения защитных покрытий методом детонационного напыления, который защищён патентом Республики Казахстан на изобретение (Приложение А - Способ получения износостойких покрытий с помощью детонационного напыления, №36690 опубликован 12.04.2024 г.).

**Личный вклад автора.** Совместно с научным консультантом определение цели и постановки задач исследований, самостоятельное планирование экспериментов и получение основного объема экспериментальных результатов, изложенных в диссертации, анализ полученных результатов, формулировке выводов и положений, выносимых на защиту, подготовка публикаций по теме диссертации.

#### **Апробация работы.**

В рамках диссертационной работы и полученных на её основе результатов были опубликованы, представлены и обсуждены следующие материалы.

**Статьи с импакт-фактором, входящие в международную научную базу данных Scopus**

1. **Dautbekov M.K.**, Rakhadilov B.K., Zhurerova L.G., Kakimzhanov D.N., Elistratov S.L., Segeda T.A. A Technology for Making Detonation Coatings on Power Equipment Parts Made of Grade 12Kh1MF Steel // Thermal Engineering. – 2022. – Vol. 69(12). – P. 989-995. DOI:10.1134/S0040601522120011 (Scopus CiteScore (2022) 1.5, Процентиль 31-й #172/252 Energy Engineering and Power Technology Web of Science: квартиль Q3)

2. Rakhadilov B., Kakimzhanov D., **Dautbekov M.**, Sagdoldina Zh., Adylkanova M., Abylkalykova R. Influence of Spraying Parameters on the Structure and Tribological Properties of Cr3C2-NiCr Detonation Coatings // Advances in Tribology. – 2023. – Vol. 2023. – P. 9. DOI: <https://doi.org/10.1155/2023/6684656> (Scopus CiteScore (2023) 5.0 Процентиль 72-й #184/672 Mechanical Engineering, Процентиль 64-й #48/132 Surfaces, Coatings and Films Web of Science: квартиль Q2)

**Статьи в изданиях, рекомендуемых Комитетом по обеспечению качества в сфере науки и высшего образования МНВО РК:**

3. **Даутбеков М.К.**, Журерова Л.Г., Сатбаева З.А., Магазов Н.М. Повышение эксплуатационных свойств деталей энергетического оборудования, работающих в нагруженном состоянии Вестник Торайгыров университета. – Вып. 2. – С. 79-93. DOI: <https://doi.org/10.48081/XONN28007>.

4. Б. К. Рахадиллов, **Даутбеков М.К.**, Л. Г. Журерова, О. А. Степанова, А. М. Акаев. Технология получения покрытий методом детонационного напыления на деталях энергетического оборудования тепловых станций Вестник Торайгыров университета Энергетическая серия № 2 (2023), С. 282-394.

5. Какимжанов Д.Н., **Даутбеков М.К.**, Турабеков Е.С., Куанышбай Р.М., Рустемов А.С. Влияние изменения расстояния импульсно-плазменной обработки на свойства детонационных покрытий CR3C2-NiCr. Вестник Университета Шакарима. Серия технические науки. 2024;1(4(16)):310-319.

6. Б. К. Рахадиллов, Д. Н. Какимжанов, **Даутбеков М.К.**, О. В. Колисниченко Технология нанесения дуплексных покрытий на детали энергетического оборудования Вестник Торайгыров университета Энергетическая серия № 3 (2023), С. 306-318 <https://doi.org/10.48081/YBCY7199>

7. D. N. Kakimzhanov, B. K. Rakhadilov, Yu. N. Tyurin, O. V. Kolisnichenko, L. G. Zhurerova, **M.K. Dautbekov** Influence of pulsed plasma treatment on phase composition and hardness of Cr3C2-NiCr coatings Eurasian Journal of Physics and Functional Materials 2021. Vol.5, No.1(6) P 45-51

#### **Материалы конференции, труды и постеры**

8. **Dautbekov M.**, Improvement of Operational Properties of Power Equipment Parts Operating in a Loaded State //2024 IEEE 14th International Conference Nanomaterials: Applications & Properties (NAP). – IEEE, 2024.

9. **Даутбеков, М.** Технология нанесения детонационных покрытий на деталях энергетического оборудования// IV Ежегодная международная конференция Казахстанского физического общества (KPS), 4–7 июня 2025 г. – Усть-Каменогорск, 2025;

10. **Dautbekov, M.** Application of protective NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> coatings on parts of power equipment operating under stressed conditions / M. Dautbekov, L. Zhurerova, D. Kakimzhanov // Proceedings of International Conference “Fundamental and Applied Problems of Modern Physics”. – Tashkent, 2023. – P. 18;

11. Magazov, N. M. Plasmatron for air plasma spraying of nitride coatings / N. M. Magazov, **M. K. Dautbekov** // World Conference on Materials Science and Nanotechnology (WCMSN-2022), November 7–8, 2022. – Bangkok, 2022. – P. 15

#### **Патент**

12. Патент на изобретение № 360690., Способ получения износостойких покрытий с помощью детонационного напыления., Дата регистрации в Государственном реестре изобретений 12.04.2024., Б.К. Рахадиллов, Д.Н.Кәкімжанов, Ж.Б. Сағдолдина, **Даутбеков М.К.**

**Структура и объем диссертации.** Диссертация включает в себя введение, четыре главы, заключение, список литературы из 173 наименований и 4 приложений, изложена на 137 страницах машинописного текста, содержит 69 рисунков и 14 таблиц.