

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2023-4-22-31>

УДК 621.45.038.7

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РЕШЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ПРОЦЕССА ТЕРМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ HVOF ДЛЯ ПОКРЫТИЯ $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$

**Б. К. Рахадиллов<sup>1</sup>, Ш. Р. Курбанбеков<sup>1,3,4</sup>, Б. Сейтов<sup>1</sup>, Н. Муктанова<sup>2</sup>, Д. Э. Балтабаева<sup>3,4\*</sup>, К. Катпаева<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Восточно-Казахстанский университет им. С. Аманжолова, Усть-Каменогорск, Казахстан

<sup>2</sup> Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан

<sup>3</sup> Международный казахско-турецкий университет имени Х.А. Ясави, Туркестан, Казахстан

<sup>4</sup> ТОО «Институт инновационных технологий и новых материалов», Туркестан, Казахстан

\* E-mail для контактов: dil.baltabaeva315@gmail.com

В статье рассмотрены теоретические исследования покрытия из  $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$  для подложки из циркония. Для получения данного покрытия был исследован один из высокоэффективных методов – высокоскоростное кислородно-топливное термическое напыление (HVOF). Нанесение покрытия производилось на различные образцы подложек из циркония толщиной 3–5 мм, длиной 20 мм и шириной 30 мм, при скорости напыления 600–700 м/с. Температура во время напыления методом HVOF составляет около 3000 °С, температура охлаждения 27 °С. Исследуя теоретические данные для покрытия из  $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$  определены развивающиеся и тепловые напряжения после обработки HVOF методом Стоуна и уравнения Бреннера и Сендероффа с толщиной покрытия не более 0,6 мм для карбидных покрытий. По результатам теоретических исследований были найдены значения эффективности осаждения методом, предложенным Kosaku Shinoda. По результатам теоретических и математических расчетов эффективность осаждения для покрытия из  $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$  с подложкой циркония находится в пределах 59,5–69,4%. Таким образом, было установлено, что эффективность осаждения для покрытий зависит от толщины подложки, скорости подачи порошка, а также от массы наносимого материала и, соответственно, от количества проходов напыления.

**Ключевые слова:** HVOF, эффективность осаждения, покрытие  $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ , цирконий, остаточное напряжение.

### ВВЕДЕНИЕ

Современную промышленность невозможно представить без развития энергетики. Достижения ученых в области квантовой и ядерной физики, материала и металловедения уже нашли свое применение в создании атомных электростанций. Безопасная ядерная энергетика, безусловно, возможна, и атомные электростанции в настоящее время во многом экологически безопаснее, чем электростанции, функционирующие на органическом топливе. Среди приоритетных направлений развития науки и ядерных технологий можно выделить разработки технологий делящихся и радиоактивных материалов, технологий переработки облученного ядерного топлива и обращения с радиоактивными отходами, а также разработку поглощающих элементов. Особое место в ядерной промышленности и энергетике занимает проблема создания и модернизации материалов, из которых конструируют области ядерных реакторов, где располагается ядерное топливо и происходит цепная реакция деления. К таким материалам относятся прежде всего циркониевые сплавы. Цирконий и его сплавы отличаются высокой пластичностью, износоустойчивостью, теплопроводностью, жаростойкостью, исключительной стойкостью к коррозии в условиях интенсивного нейтронного облучения и агрессивных средах [1].

Цирконий – материал, который при воздействии определенных факторов может изменять форму, че-

му способствует полиморфное ( $\alpha + \beta$ )-превращение. Цирконий также подвержен радиационному росту, который особенно сильно проявляется при длительном облучении (радиационная ползучесть). Циркониевые сплавы обладают высокой коррозионной устойчивостью и низким сечением поглощения тепловых нейтронов при нормальных условиях эксплуатации. Неотъемлемой частью технологии производства полуфабрикатов циркониевых сплавов является нагрев в печах с воздушной атмосферой. Цирконий и его сплавы являются геттерными материалами (активно вступают в реакцию с кислородом на воздухе). В связи с этим высокотемпературную термическую обработку циркониевых сплавов следует проводить в вакуумных печах либо в печах с инертной атмосферой [2].

Известно, что защитные технологические покрытия эффективно защищают поверхность металлических изделий при термической обработке от окисления и газонасыщения, что позволяет термообработать их в печах с воздушной атмосферой. Для циркониевых сплавов необходимо создание покрытия, которое, кроме защиты от окисления и газонасыщения, позволит совместить температуры формирования покрытия с технологическим режимом нагрева. В то же время покрытие не должно содержать элементы, обладающие большим сечением поглощения тепловых нейтронов, такие как В, Со, W и др. Значительную трудность представляет разработка низкотемпера-

турного безборного покрытия, поскольку борный гидрид является одним из основных компонентов легкоплавких эмалей, способствует уменьшению кристаллизационной способности покрытий, увеличивает электросопротивление и химическую устойчивость. Одними из основных требований к защитным технологическим покрытиям являются хорошие смазывающие свойства и адгезия с металлом в процессе деформации [3–4].

Высокотемпературное окисление циркониевых сплавов исследуют при температурах 600–1200 °С. Кислород взаимодействует с циркониевыми сплавами, начиная с 780 °С. Образуются оксидная пленка и зона под пленкой, обогащенная кислородом, в результате чего наблюдается резкое снижение пластичности. Установлено, что разрушение пленки происходит из-за фазового перехода гексагональной плотноупакованной решетки в объемно-центрированную кубическую. Несоответствие объемных факторов этих фаз приводит к изменению размеров изделий и деформации оксидных пленок. При этом цирконий имеет пониженную прочность, что приводит к появлению трещин и потере эстетического вида. Традиционные способы защиты основаны на том, чтобы сохранить цирконий. Это можно сделать с помощью изменения состояния поверхности для повышения коррозионной стойкости или нанесения защитных покрытий [5–6].

Для повышения твердости, износо- и коррозионно-стойкости циркониевых сплавов на их поверхности различными методами формируют функциональные покрытия, например оксидные. Оптимальными покрытиями являются те, которые включают элементы, образующие наиболее прочные оксидные пленки. Требуемой прочностью обладает оксид циркония, но при повышении температуры происходят фазовые превращения. Оксидами с меньшей теплотой образования являются оксиды алюминия и хрома. Последний позволяет обеспечить препятствие диффузии кислорода. Известные технологии формирования на циркониевых сплавах оксидных покрытий обладают рядом недостатков, а именно большой продолжительностью процесса, технологической сложностью и токсичностью применяемых материалов, что способствует появлению новых методов формирования защитных покрытий на изделиях из циркониевых сплавов [7].

Наиболее эффективное повышение стойкости циркониевых сплавов к высокотемпературному окислению достигнуто с применением нанесения хромовых покрытий с тугоплавким керамическим или металлическим подслоем. Разработка технологий нанесения покрытий на оболочки твэлов в настоящее время активно ведётся в России (ТРИНИТИ, МИФИ, Красная Звезда, ВНИИНМ, НИИАР, МЭИ), США (MIT, WE, GE, GNF, UChicago Argonne, PennState), Франции (CEA, Framatome), Китае (NPIC, SCU, CGN), Южной Кореи (KAERI, KHNP), Чехии (STU,

UJP) и Украине (ННЦ ХФТИ). Хромовые покрытия на циркониевых сплавах также обеспечивают:

- повышенную износостойкость (потеря массы образца в среднем в 5 раз меньше);
- повышенную коррозионную стойкость в паре при 1200 °С (привес массы за 2 часа в 20 раз меньше);
- пониженную водородопроницаемость: показано, что за 4 ч. окисления в паре при 1000 °С количество поглощённого водорода в сплав Zry-4 с покрытием 10 мкм Cr не превышает 80 ppm; показано, что количество водорода в образцах циркония (Zr) с хромовым покрытием после автоклавных испытаний (400 °С, 200 атм) уменьшается с 5,5 до 0,1 молекулы H<sub>2</sub>/г;
- окисление по параболическому закону без наступления линейной стадии [8–10].

Baczynski в своей научной работе (2014 г.) исследовал покрытие из титана из подложки Zry-2 методом магнитного распыления с толщинами 0,0215 мкм, 0,043 мкм, 0,0645 мкм при температуре окисления в водяном паре 700 °С. Если кратко описать метод магнитного распыления, то это технология нанесения тонких плёнок на подложку с помощью катодного распыления мишени в плазме магнетронного разряда – диодного разряда в скрещённых полях. Технологические устройства, предназначенные для реализации этой технологии, называются магнетронными распылительными системами, или, сокращённо, магнетронами. Примечательно в этой работе то, что покрытие титана оказывало положительное влияние на предотвращение окисления при высокой температуре, когда толщина слоя покрытия была выше 42 нм [11].

Kim и др. в научной статье (2015 г.) получили покрытие на основе хрома (Cr) с подложкой из Zry-4 методом лазерного осаждения при толщине 80 мкм, в котором условия испытания были такие как, адгезионные испытания и высокотемпературное окисление при 1200 °С. Примечания, которые сделали авторы таковы, при механических и коррозионных испытаниях не происходило отслоение покрытий; при испытаниях на растяжение и сжатие формировались трещины; толщина оксидного слоя при высокотемпературном окислении была снижена в 25 раз в сравнении со сплавом без покрытия [12].

Brachet и др. (2015 г.) в научной работе для эксперимента взяли покрытие на основе Cr с подложкой из Zry-4. Метод нанесения в этой статье был физическое осаждение из паровой фазы при толщине около 20 мкм, при условиях испытания на коррозию в условиях автоклава и высокотемпературное окисление при температуре 1000–1200 °С. Особенности этой работы были в том, что покрытие на основе хрома обладало плотной микроструктурой; была показана более высокая прочность и пластичность сплава с покрытием Cr после испытания на окисление, что обусловлено более низкой кинетикой окисления [13].

Валеева и др. (2012 г.) в своей научной работе исследовали два вида покрытия, такие как Ni со стеклянкой смазкой с подложкой из Э125 методом химического осаждения при толщине 30–40 мкм при условии испытаний воздушный отжиг 700–1000 °С. Примечания, которые сделали авторы таковы, была показана эффективность защиты покрытия Ni при температуре до 800 °С; также оксидные слои не образовались в сплавах с двойным слоем [14].

Научное исследование покрытия Zhong и др. (2016 г.) основано на FeCrAl при подложке Zry-2 методом магнетронного распыления при толщине 0,3–1,3 мкм, в котором условием испытания было окисление в водяном паре при температуре 700 °С. Примечание, которое было сделано таково, были исследованы 4 состава FeCrAl при разной стехиометрии; FeCrAl с более высоким содержанием Al в составе способствует образованию оксида алюминия, что снижает скорость коррозии основного металла, но минус был в том, что оксид алюминия привел к появлению пор в покрытии, а также для повышения стойкости к окислению для Zry-2 требуется более толстое покрытие [15].

В работе Maier и др. (2015 г.) было исследовано покрытие на основе Ti<sub>2</sub>AlC при подложке из Zry-4, методом холодного распыления, толщина при эксперименте была около 90 мкм при испытании на окисление в воздушной атмосфере при 700 и 1005 °С. Примечания, которые сделали авторы – покрытие обладает более высокой твердостью (800 HV), чем Zry-4, а также плотностью и хорошей адгезией к подложке; также покрытие снижает скорость окисления сплава, однако для дальнейшего использования требуется тонкое покрытие (около 30 мкм) [16].

В статье Alat и др. было исследовано покрытие на основе Ti<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>N (0.54 < x < 0.67)/ TiN при подложке ZIRLO методом катодно-дугового осаждения при толщине 4–12 мкм на условиях автоклавного испытания при 360 °С, 18,7 МПа в течении 3 дней. Особенности этой работы такие: Ti подслоем наносился в качестве связующего слоя между керамическим покрытием и сплавом ZIRLO; были достигнуты высокие показатели по коррозионной стойкости и адгезии покрытия; из минусов было то, что обеднение Al происходило в образцах, покрытых однослойным TiAlN, что привело к появлению метаксидоксида алюминия AlO(OH), что снижало коррозионную стойкость. Таким образом, для решения проблемы был рекомендован барьерный слой TiN поверх TiAlN [17].

Khatkhatay и др. (2014 г.) исследовали покрытие на основе Ti/N-Ti<sub>0,35</sub>Al<sub>0,65</sub>N при подложке Zry-4 методом импульсивного лазерного осаждения при толщине 1 мкм на условиях автоклавного испытания при 500 °С, 25 МПа. Примечания авторов: покрытия приводили к повышению коррозионной стойкости; покрытие Ti/N показало лучшие защитные свойства в сравнении с покрытием Ti<sub>0,35</sub>Al<sub>0,65</sub>N [18].

Daub и др. в научной работе (2015 г.) исследовали покрытие на основе CrN, TiAlN, AlCrN при подложке Zry-4 методом физического осаждения из паровой фазы толщиной 2–4 мкм, при условиях автоклавного испытания, высокотемпературное окисление при 1100 °С и испытание на водонепроницаемость. Примечания в этой статье были таковы: покрытие AlCrN обладало плохими защитными свойствами, что было доказано плохой адгезией и образованием трещин при высокотемпературном окислении; а покрытие CrN обеспечило лучшую коррозионную стойкость и защиту от водорода; для TiAlN была предложена дальнейшая работа по изучению влияния механических повреждений на защитные свойства покрытий [19].

В работе Rezae и др. (2013 г.) было изучено покрытие на основе ZrO<sub>2</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> при подложке из Zry-4 методом Золь-гель толщиной 0,97 мкм, при условиях термообработки, электрохимического измерения и испытания на окисление. Особенности этой научной работы заключены в том, что качество поверхности и коррозионные свойства покрытий сильно зависели от температуры термообработки, а также трещины наблюдались в покрытиях, высушенных при низких температурах; плюсом этой работы является то, что высокая антикоррозионная защита была достигнута только при сушке при температуре 700 °С [20].

Jim и др. (2016 г.) в научных работах изучили покрытие Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr при подложке Zr-2.5Nb методом HVOF по толщине 250 мкм, при условиях автоклавных испытаний, окисление в воздушной атмосфере и в паре при температуре 700–1000 °С. Примечания, которые были сделаны, таковы: покрытие обладало хорошей адгезией, но имело большое количество микропор; в сравнении с непокрытым сплавом, сплав с покрытием обладал хорошей стойкостью к окислению; а также при автоклавных испытаниях наблюдалось образование трещин на границе покрытия с подложкой [21].

В работе Ashcheulov и др. (2015 г.) было изучено покрытие из поликристаллического алмаза на подложке из Zry-2 методом химического осаждения из паровой плазмы с микроволновой плазмой при толщине 0,3 мкм в условиях окисления на водяном паре при 950 °С. Примечания, сделанные авторами: более тонкий оксидный слой формировался на сплаве с покрытием; покрытие повышало коррозионную стойкость сплава; а также покрытие ограничивало диффузию водорода циркониевого сплава Zry-2 [22].

В работе Wiklund и др. (1996 г.) было изучено покрытие из многослойного Ti\TiN на подложке из Zry-4 методом физического осаждения из паровой фазы при толщинах 1,0 мкм, 2,0 мкм, 3,5 мкм, 3,7 мкм при условиях автоклавных испытаний, испытание на наводороживание. Примечания к этой работе таковы: были исследованы многослойные Ti\TiN и однослойные TiN покрытия; также незначительное отслоение наблюдались на образцах с однослойным покрытием,

в то время как многослойное покрытие не нарушало сплошности; таким образом сплав с обоими покрытиями показал гораздо меньшее наводороживание, чем сплав без покрытия [23].

Куприн и др. (2015 г.) в научных работах изучили многослойное покрытие на основе Zr/Cr/Cr-N на подложке из Э110 и Zr 1% Nb методом вакуумно-дуговой фильтрации плазмы толщиной 7 мкм при условиях испытания окисления в воздушной атмосфере при температурах 660, 770, 900, 1020, 1100 °С. Примечания, которые сделали авторы: сформирована трехслойная структура Cr<sub>3</sub>Zr/Cr/Cr-N последовательным осаждением из плазмы вакуумно-дугового разряда; в результате окисления образовались оксиды, такие как CrO и Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, обеспечивающие снижение проникновения кислорода через покрытие; а также за счет высокой твердости и плотной микроструктуры (около 27 МПа) покрытие обеспечивает высокую износостойкость [24].

Сиделёв Д.В., Кашкаров Е.Б., Сыртанов М.С., Кривобоков В.П. изучили циркониевые сплавы, используемые в качестве материала оболочки в водородных реакторах, они имеют низкое сечение поглощения тепловых нейтронов и высокую стойкость к коррозии при нормальных условиях эксплуатации. Для улучшения функциональных и механических свойств материала топливных оболочек разработаны сплавы циркония с легирующими примесями (Nb, Sn, Fe и Cr) [25].

Численное исследование процесса HVOF в основном сосредоточено на понимании физико-химических явлений в процессе, таких как реакция горения, динамика газового потока и поведение частиц в полете. Напыление HVOF быстро развивалось в первые годы 21-го века по мере развития технологии CFD. Учитывая большое количество параметров или факторов в процессах HVOF, в соответствующих работах были исследованы четыре важных аспекта, влияющих на качество покрытия: конструкцию сопла, реакцию горения, частицы порошка и компонент подложки.

Mohammed N. Khan, Tariq Shamim дополнительно исследовали влияние геометрии сопел и физико-химические характеристики в двухступенчатой системе HVOF [26].

S. Pap и др. также построили двумерную модель HVOF на жидком топливе, но с химической реакцией на керосине, и проанализировали влияние свойств частиц на их поведение в полете. Совсем недавно некоторые исследователи сосредоточились на численном моделировании более совершенного процесса суспензионного HVOF (SHVOF) [27].

M. Jadidi и его коллеги построили трехмерную двусторонне связанную модель Эйлера-Лагранжа для анализа поведения частиц суспензии в полете в своих ранних публикациях. Затем они дополнительно исследовали влияние формы подложки на поведение частиц и проанализировали скорость улавливания

для различных форм подложки и расстояний между ними. В целом, большинство предыдущих исследовательских работ было сосредоточено на численном анализе физико-химического явления в HVOF с различных аспектов. Применение этих моделей при моделировании толщины покрытия по-прежнему ограничено [28].

В данной работе проведены математические анализы термического напыления HVOF в оптимальных режимах для подложки из циркония с толщиной 3–5 мм и определение напряжений во время процесса. Целью теоретического исследования являлись математические аспекты HVOF и нахождения эффективности осаждения для покрытия Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr.

#### **РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ HVOF**

Технология высокоскоростного кислородно-топливного термического напыления (HVOF) получила широкое распространение во многих отраслях промышленности благодаря своей гибкости и экономической эффективности при получении покрытий высшего качества. Спрос высокотехнологичных отраслей промышленности и доступность новых передовых материалов привели к значительным достижениям в этой области.

Процесс термического напыления HVOF используется для нанесения покрытий на компоненты для защиты от износа, перегрева и коррозии, а также для восстановления изношенных компонентов. Эта технология напыления не ограничивается нанесением покрытия на подложки, но также включает в себя изготовление сетчатых деталей из материалов, которые иногда трудно формовать обычными методами. Знание свойств покрытий, методов тестирования и оценки необходимо для того, чтобы применить технологию нанесения покрытий для конкретного применения. Хотя параметры распыления и подготовка поверхности подложки непосредственно влияют на свойства покрытия, не менее важно знать технику распыления, необходимую для нанесения покрытия, обладающего этими свойствами, и параметры обработки, которые необходимо нанести. Остаточные напряжения при растяжении в сочетании с увеличением толщины покрытия приводят к снижению прочности сцепления с увеличением толщины покрытия. Оптимизация ремонта поврежденных компонентов с использованием технологии HVOF предполагала использование аналогичных комбинаций порошковых материалов и подложки. Были проведены испытания для определения адгезионной прочности восстановленного материала, нанесенного напылением в различных условиях, которые варьировались, включая (1) толщину восстановленного материала, (2) термообработку перед ремонтом и после ремонта, (3) угол наклона ремонтируемой стенки и (4) подготовку поверхности основания. Кроме того, была оценена возможность финишной обработки этих отремонтированных компонентов [29–32].

Принято считать, что физико-механические свойства газотермических покрытий: плотность и прочностные характеристики, в том числе адгезия и когезия определяются такими параметрами наносимых частиц, как скорость и температура при ударе о напыляемую поверхность. Среди многообразия газотермических методов нанесения покрытий следует выделить процессы, использующие для ускорения наносимых частиц сверхзвуковые потоки продуктов сгорания. К таким технологиям относятся методы высокоскоростного (HVOF) и детонационного напыления. Известно достаточно большое количество работ, в которых подробно приведен анализ свойств покрытий, получаемых вышеуказанными методами. Следует отметить, что в основном там рассматриваются покрытия на основе твердого сплава или металлические на основе Fe, Ni, Co.

Преимуществами высокоскоростного газопламенного метода HVOF по сравнению с другими методами газотермического напыления являются достаточно высокая скорость частиц (до 750 м/с) и минимальная пористость получаемого покрытия (1–4%). На практике широко используются такие выпускаемые серийно устройства HVOF, как JP-5000/8000 (Tafa-Praxair, USA), DJ 2600/2700 (Sulzer Metco, USA), Intelli-Jet (Solid Spray Technologies, USA), HV 50 HVOF (Flame Spray Technologies, the Netherlands) и другие. Как пример удачного совершенствования устройства HVOF можно привести горелку TOPGUN®AIRJET, которая может распылять порошки и проволоки. Национальный институт металлов (NIMS) в Японии разработал насадку на устройство для HVOF, которая снижает температуру рабочего газа. В эту насадку дополнительно подают до 30 м<sup>3</sup>/час азота. Наиболее интересна горелка HVAF-Intelli-Jet, которая представлена Joint Stock Company “Mashprom” (Екатеринбург, Россия).

На основе применения современного детонационного и высокоскоростного (HVOF) оборудования разных производителей следует отметить, что количество используемых напыляемых материалов из оксидной керамики (оксида алюминия, хрома и циркония) составляет около 40%, металлокерамики – до 40%, из металлов и сплавов – до 20% [33–34].

Керамическое покрытие  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , нанесенное плазменным напылением, из-за его склонности к хрупкому растрескиванию может быть рекомендовано только для условий износа при скольжении. Из-за микрощварок были удалены более крупные детали покрытия; это наблюдалось главным образом в покрытии  $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ . Напыляемое покрытие состоит из первичных карбидов, оксида хрома и смеси аморфной и нанокристаллической фаз связующего. Микроструктура и показатели микроабразивного износа как непокрытых, так и покрытых подложек были охарактеризованы с помощью оптической микроскопии. Покрытие продемонстрировало превосходную износостойкость при испытании методом образования шариковых кратеров.

Металлокерамика  $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$  широко используется для износостойких и коррозионно-стойких применений. Покрытия системы WC-Co, как правило, обладают высокой твердостью и износостойкостью, а также на их поверхности идентифицированы первичные карбиды, оксид хрома и аморфная смесь.

Термически напыляемые покрытия на основе порошков  $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$  широко используются для улучшения таких свойств, как твердость поверхности и износостойкость различных материалов металлических подложек с покрытием. На подложке из серого чугуна покрытие порошком  $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$  улучшает эксплуатационные характеристики. Нанесение покрытия производится методом HVOF, поскольку этот процесс обеспечивает высокую адгезию материала покрытия к основанию и низкую пористость поверхности с покрытием [35].

Выбор метода нанесения покрытия и исходного материала основывается на принципах организации сгорания газовых продуктов, применяемых в конкретном процессе. Расход непрерывно истекающего через сопло Лавала сверхзвукового потока продуктов сгорания для HVOF-устройств примерно в 4–6 раз выше, чем расход сверхзвукового импульсного потока при детонационном напылении при условии нанесения одинакового объема покрытия. Наиболее существенное отличие заключается в эффективных размерах длин стволов устройств HVOF-оборудования и детонационных установок. В последних длина ствола с диаметром, например, 27 мм составляет 900 мм, что в десятки раз превышает протяженность длины ствола устройств HVOF-оборудования. При этом известно, что в этой части оборудования происходит нагрев исходных частиц порошкового материала до требуемой температуры. Именно этим обстоятельством очевидно и вызваны затруднения качественного формирования покрытий на основе оксидов алюминия, хрома и циркония при высокоскоростном (HVOF) напылении.

Кроме этого важно отметить, что параметр трудности плавления у оксидов, значительно выше, чем у металлов и их сплавов, что и затрудняет получение качественных покрытий из оксидов при HVOF-процессе. Вторая особенность выбора технологии нанесения покрытия заключается в том, что при нанесении HVOF-покрытий существует возможность перегрева деталей и повышенных деформаций. Поэтому в большинстве случаев требуется организация принудительного охлаждения, что не всегда удобно и возможно. В виду этого HVOF-процесс в большинстве случаев используется для напыления на крупногабаритные детали. Кроме этого следует отметить и существенное увеличение припуска на толщину покрытия для HVOF-процесса. При нанесении детонационных покрытий поводок обычно не наблюдается и организация принудительного охлаждения не требуется [36].

Датчик ICP использовался для контроля кривизны и температуры подложки в зависимости от времени во время и после распыления. Для измерения температуры подложки с обратной стороны подложки установлены две контактные термопары. Кривизна во время нанесения измеряется по отклонению трех точек, измеренному лазерными датчиками, которое преобразуется в кривизну. Кривизна используется для вычисления возникающего напряжения или напряжения осаждения, определяемого здесь как номинальное остаточное напряжение для осажденного слоя, включающее эффект закалки и упрочнения частиц в каждом слое. Термин развивающийся стресс используется для обобщения наличия обоих эффектов при HVOF. Принцип измерения предполагает, что каждый нанесенный слой намного тоньше подложки, и напряжение от измеренного изменения кривизны рассчитывается с использованием уравнения Стоуна [37]:

$$\sigma_{ev} = \left( \frac{E'_s t_s^2}{6} \right) \left( \frac{dk}{dt_c} \right), \quad (1)$$

где:  $\sigma_{ev}$  – развивающееся напряжение,  $E'_s$  – модуль упругости подложки в плоскости,  $t_s$  – толщина подложки,  $dk$  – изменение кривизны, вызванное изменением толщины покрытия  $dt_c$ .  $dk/dt_c$  учитывается после первого или второго нанесенного слоя, чтобы пренебречь взаимодействием первых проходов с подложкой.

Тепловые напряжения рассчитываются во время охлаждения путем измерения изменения кривизны, вызванного градиентом температуры охлаждения, от температуры осаждения до комнатной температуры и с использованием формулы Бреннера и Сендерофа [38]:

$$\sigma_t = \left( \frac{\Delta k E'_s t_s}{6 t_c} \right) \left( t_s + (E'_c / E'_s)^{5/4} t_c \right), \quad (2)$$

где:  $\sigma_t$  – тепловое напряжение,  $\Delta k$  – изменение кривизны при охлаждении,  $t_c$  – толщина покрытия,  $E'_c$  – модуль упругости покрытия. Конечное остаточное напряжение вычисляется путем сложения предыдущих результатов, таким образом:

$$\sigma_{rs} = \sigma_{ev} + \sigma_t. \quad (3)$$

Эффективность осаждения определяли с использованием метода, предложенного Kosaku Shinoda. Они определили эффективность осаждения  $\eta_d$  как массовое отношение нанесенного покрытия к введенному порошку на подложку, т.е.:

$$\eta_d = \frac{M_d}{L(WR_f / W_s U) N_p} \times 100 (\%),$$

где:  $L$  и  $W$  – длина и ширина подложки;  $M_d$ ,  $W_s$ ,  $R_f$ ,  $U$ ,  $N_p$  – масса наносимого материала, ширина шага,

скорость подачи порошка, скорость растривания и количество проходов соответственно [39].

Авторами работ Н. Ruiz-Luna и др. «Effect of HVOF Processing Parameters on the Properties of NiCoCrAlY Coatings by Design of Experiments» была представлена таблица эффективности осаждения циркония для покрытия из NiCoCrAlY [40].

Таблица 1. Параметры для математических расчетов эффективности осаждения покрытия NiCoCrAlY [40]

Расстояние распыления, мм	Расход топлива (пропан SCFH)	Расход кислорода (SCFH)	Скорость подачи порошка, г/мин	$k$	Скорость робота, м/с	Эффективность осаждения, %
150	118	375	35	1-15	1,0	65,5-68,5
200						
250						
300						
350						

Теперь рассчитаем значение развивающегося и теплового напряжения из формул (1) и (2). Чтобы показать и сделать математический расчет эффективности осаждения циркония для покрытия из Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr эксперимент был проведен в НИЦ ТОО «Plasma Science». Таким образом, были определены экспериментальные данные по цирконию и по покрытию Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr для математических расчетов. Модуль упругости подложки  $E'_s = 97 \text{ ГН/м}^2$ , толщина подложки  $t_s = 3-5 \text{ мм}$ ,  $t_c$  – толщина покрытия не больше 0,6 мм, изменение кривизны, вызванное изменением толщины покрытия  $k = 1-6$ , модуль упругости покрытия  $E'_c = 36 \text{ ГН/м}^2$ , изменение кривизны при охлаждении  $\Delta k = 1-6$ .

Подставляя эти значения, получаем:

$$\begin{aligned} \sigma_{ev1} &= (E'_s t_s^2 / 6)(dk / dt_c) = \\ &= \frac{97 \cdot 10^9 \cdot (3 \cdot 10^{-3})^2}{6} \cdot \left( \frac{dk}{dt_c} \right) = 242,5 \cdot 10^6 \text{ (Па)}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{ev2} &= (E'_s t_s^2 / 6)(dk / dt_c) = \\ &= \frac{97 \cdot 10^9 \cdot (4 \cdot 10^{-3})^2}{6} \cdot \left( \frac{dk}{dt_c} \right) = 431,1 \cdot 10^6 \text{ (Па)}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{ev3} &= (E'_s t_s^2 / 6)(dk / dt_c) = \\ &= \frac{97 \cdot 10^9 \cdot (5 \cdot 10^{-3})^2}{6} \cdot \left( \frac{dk}{dt_c} \right) = 673,6 \cdot 10^6 \text{ (Па)}. \end{aligned}$$

Получив значения развивающегося напряжения, тем же способом сделаем расчет теплового напряжения:

$$\sigma_{t_1} = \left( \Delta k E_s^t t_s / 6 t_c \right) \left( t_s + \left( E_c^t / E_s^t \right)^{\frac{5}{4}} t_c \right) =$$

$$= \frac{1 \cdot 97 \cdot 10^9 \cdot 3 \cdot 10^{-3}}{6 \cdot 0,6 \cdot 10^{-3}} \cdot \left( 3 \cdot 10^{-3} + \left( \frac{36 \cdot 10^9}{97 \cdot 10^9} \right)^{\frac{5}{4}} \cdot 0,6 \cdot 10^{-3} \right) =$$

$$= 492 \cdot 10^6 \text{ (Па)},$$

$$\sigma_{t_2} = \left( \Delta k E_s^t t_s / 6 t_c \right) \left( t_s + \left( E_c^t / E_s^t \right)^{\frac{5}{4}} t_c \right) =$$

$$= \frac{1 \cdot 97 \cdot 10^9 \cdot 4 \cdot 10^{-3}}{6 \cdot 0,6 \cdot 10^{-3}} \cdot \left( 4 \cdot 10^{-3} + \left( \frac{36 \cdot 10^9}{97 \cdot 10^9} \right)^{\frac{5}{4}} \cdot 0,6 \cdot 10^{-3} \right) =$$

$$= 765 \cdot 10^6 \text{ (Па)},$$

$$\sigma_{t_3} = \left( \Delta k E_s^t t_s / 6 t_c \right) \left( t_s + \left( E_c^t / E_s^t \right)^{\frac{5}{4}} t_c \right) =$$

$$= \frac{1 \cdot 97 \cdot 10^9 \cdot 5 \cdot 10^{-3}}{6 \cdot 0,6 \cdot 10^{-3}} \cdot \left( 5 \cdot 10^{-3} + \left( \frac{36 \cdot 10^9}{97 \cdot 10^9} \right)^{\frac{5}{4}} \cdot 0,6 \cdot 10^{-3} \right) =$$

$$= 1,1 \cdot 10^9 \text{ (Па)}.$$

После этого найдем суммарное значение остаточного напряжения, через сумму развивающегося и теплового напряжения по формуле (3). Результаты представлены в таблице.

$$\sigma_{rs_1} = \sigma_{ev_1} + \sigma_{t_1} = 242,5 \cdot 10^6 + 492 \cdot 10^6 = 734,5 \cdot 10^6 \text{ (Па)},$$

$$\sigma_{rs_2} = \sigma_{ev_2} + \sigma_{t_2} = 431,1 \cdot 10^6 + 765 \cdot 10^6 = 1,2 \cdot 10^9 \text{ (Па)},$$

$$\sigma_{rs_3} = \sigma_{ev_3} + \sigma_{t_3} = 673,6 \cdot 10^6 + 1,1 \cdot 10^9 = 1,77 \cdot 10^9 \text{ (Па)}.$$

Таблица 2. Суммарное значение остаточного напряжения, через сумму развивающегося и теплового напряжения

$E_s^t$ (ГН/м <sup>2</sup> )	$E_c^t$ (ГН/м <sup>2</sup> )	$t_s$ (мм)	$t_c$ (мм)	$k$	$\sigma_{ev}$ (Па)	$\sigma_t$ (Па)	$\sigma_{rs}$ (Па)
97	36	3	0,6	1-6	242,5·10 <sup>6</sup>	492·10 <sup>6</sup>	734,5·10 <sup>6</sup>
97	36	4	0,6		431,1·10 <sup>6</sup>	765·10 <sup>6</sup>	1,2·10 <sup>9</sup>
97	36	5	0,6		673,6·10 <sup>6</sup>	1,1·10 <sup>9</sup>	1,77·10 <sup>9</sup>

Сосредоточив внимание на остаточном напряжении и эффективности осаждения, кажется, что расстояние распыления является параметром, который оказывает наибольшее влияние на эти характеристики, вероятно, из-за его большого влияния на состояние частиц и температуру подложки. Что касается остаточных напряжений, то короткие расстояния распыления, такие как 150 мм, благоприятствуют остаточным напряжениям растяжения (~72 МПа), в то время как использование больших расстояний, таких как 250 мм, показывает изменение остаточного напряжения от растяжения к сжатию, (~25 МПа). Уменьшение расхода топлива и кислорода практически не влияет на конечные значения остаточных на-

пряжений, сохраняя их при растяжении. Что касается эффективности нанесения, то изменение расстояния распыления с нижнего на верхнее значение снижает эффективность нанесения примерно на 6,5%. Как видно, увеличение расхода топлива и кислорода поддерживает эффективность осаждения в пределах 65,5–68,5% (см. таблицу 1).

Что касается химического состава пламени, то высокая эффективность осаждения достигается при использовании пламени с более высокой энергией (стехиометрического и обогащенного кислородом пламени), где достигается высокая температура частиц. И наоборот, все три параметра оказывают значительное и почти равное влияние на пористость и содержание оксидов. Увеличение расхода топлива и кислорода приводит к увеличению пористости и окислению, но при увеличении расстояния распыления пористость и окислы уменьшаются. Пористость уменьшается при переходе от условий, богатых кислородом, к условиям, богатым топливом.

Химические условия с высоким содержанием топлива приводят к высоким скоростям частиц и низкоэнергетическому пламени, что, в свою очередь, снижает температуру частиц, что приводит к более желаемым характеристикам покрытий, в частности, в данном случае к низкой пористости и низкому содержанию оксидов. Хорошо известно, что на уровень окисления и пористость в значительной степени влияет химический состав пламени. Составы с высоким содержанием топлива приводят к наименьшему окислению покрытия и его пористости.

Высокие скорости частиц означают, что частицы порошка проводят меньше времени в пламени, достигая более низких температур, что приводит к низкой пористости и окислению.

Эффективность осаждения определим с использованием метода, предложенного Kosaku Shinoda:

$$\eta_d = \frac{M_d}{L \frac{WR_f}{W_s U} N_p} \times 100(\%) =$$

$$= \frac{50 \cdot 10^{-3}}{20 \cdot 10^{-3} \frac{30 \cdot 10^{-3} \cdot 700}{10 \cdot 10^{-3} \cdot 500}} \cdot 100\% = 59,5\%$$

$$\eta_d = \frac{M_d}{L \frac{WR_f}{W_s U} N_p} \times 100(\%) =$$

$$= \frac{50 \cdot 10^{-3}}{20 \cdot 10^{-3} \frac{30 \cdot 10^{-3} \cdot 600}{10 \cdot 10^{-3} \cdot 500}} \cdot 100\% = 69,4\%$$

Таким образом, эффективность осаждения для покрытия Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr на основе подложки циркония находится в интервале 59,5–69,4%.

## Выводы

В заключении можно сказать, что были проведены теоретические исследования покрытия из Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr для подложки из циркония. Для получения данного покрытия был исследован один из высокоэффективных методов – высокоскоростное кислородно-топливное термическое напыление (HVOF). Нанесение покрытия производилось на различные образцы подложек из циркония толщиной 3–5 мм, длиной 20 мм и шириной 30 мм, при скорости напыления 600–700 м/с. Температура во время напыления методом HVOF составляет около 3000 °С, температура охлаждения 27 °С. Исследуя теоретические данные для покрытия из Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr были определены развивающиеся и тепловые напряжения после обработки HVOF методом Стоуна и уравнениями Бреннера и Сендероффа с толщиной покрытия не более 0,6 мм для карбидных покрытий. По результатам теоретических исследований были найдены значения эффективности осаждения методом, предложенным Kosaku Shinoda. По результатам теоретических и математических расчетов эффективность осаждения для покрытия из Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr с подложкой циркония находится в пределах 59,5–69,4%. Таким образом, было установлено, что эффективность осаждения для покрытий зависит от толщины подложки, скорости подачи порошка, а также от массы наносимого материала и, соответственно, от количества проходов напыления.

## Благодарности

Данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP14870977).

## ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Cueva A., Sinatora W.L., Guesser A.P. and Tschiptschin A. Wear resistance of cast irons used in brake disc rotors // *Wear*. – 2003. – Vol. 255. – P. 1256–1260. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(03\)00146-7](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(03)00146-7)
2. Durga V., Rao N., Boyer B.A., Cikanek H.A. and Kabat D.M. Influence of surface characteristics and oil viscosity on friction behaviour of rubbing surfaces in reciprocating engines // *Fall Technical Conference ASME-ICE*, Paper No. 98-ICE131. – 1998. – Vol. 31-2. – P. 23–35.
3. Fang W., Cho T.Y., Yoona J.H., Song K.O., Hur S.K., Younb S.J. and Chunc H.G. Processing optimization, surface properties and wear behavior of HVOF spraying WC–CrC–Ni coating // *Materials processing technology*. – 2009. – Vol. 209. – P. 3561–3567.
4. Fleury E., Lee S.M., Kima J.S., Kima W.T., Kimc D.H. and Ahnd H.S. Tribological properties of Al–Ni–Co–Si quasicrystalline Coating against Cr-coated cast iron disc // *Wear*. – 2002. – Vol. 253. – P. 1057–1069.
5. Flor S., Beitrag Z. and Gerard B. Application of thermal spraying in the automobile industry // *Surface and Coatings Technology*. – 2003. – Vol. 201. – No. 8. – P. 2028–2031.
6. Sidhu H.S., Sidhu B.S. and Prakash S. Solid particle erosion of HVOF sprayed NiCr and Stellite-6 coatings // *Surface and Coatings Technology*. – 2007. – Vol. 202. – P. 232–238.
7. Ruchkin S.E., Pirozhkov A.V. Protective multilayer ZrO<sub>2</sub>/Cr coatings for E110 zirconium alloy. Modern problems of mechanical engineering: collection of works of the XIV International Scientific-Technologies Conference (Tomsk, October 25–30, 2021). Tomsk, 2021. – P. 179–180.
8. M. Shunmuga Priyan, A. Azad, S. Yasar, Araffath Influence of HVOF parameters on the wear resistance of Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr coating // *Journal of Materials Science & Surface Engineering*, Department of Manufacturing Engineering, Anna University, Chennai-25, India, 2016. – P. 356–359.
9. Lih W.C., Yang S.H., Su C.Y., Huang S.C., Hsu I.C & Leu M.S. Effects of process parameters on molten particle speed and surface temperature and the properties of HVOF CrC–NiCr coatings // *Surface and Coatings Technology*. – 2000. – Vol. 133–134. – No. 1. – P. 54–60.
10. Ji G.C., Li C.J., Wang Y.Y. & Li W.Y. Micro structural characterization and abrasive wear performance of HVOF sprayed Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr coating // *Surface Coatings & Technology*. – 2006. – Vol. 200. – P. 6749–6757.
11. Baczynski Christian, Simon C. O. Glover and Ralf S. Klessen, Fervent: chemistry-coupled, ionizing and non-ionizing radiative feedback in hydrodynamical simulations // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 2015. – Vol. 454. – P. 380–411.
12. Le Saux M., Vandenberghe V., Créber P., Brachet J., Gilbon D., Mardon J., Jacques P., Cabrera A. Influence of steam pressure on the high temperature oxidation and post-cooling mechanical properties of Zircaloy-4 and M5 cladding (LOCA conditions) // *Zirconium in the Nuclear Industry: 17th Volume*; ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2015.
13. Brachet J.-C., Portier L., Forgeron T., Hivroz J., Hamon D., Guilbert T., Bredel T., Yvon P., Mardon J.-P., Jacques P. Influence of hydrogen content on the α/β phase transformation temperatures and on the thermal-mechanical behavior of Zy-4, M4 (ZrSnFeV), and M5<sup>TM</sup>(ZrNbO) alloys during the first phase of LOCA transient // *Zirconium in the Nuclear Industry: Thirteenth International Symposium*; ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2002.
14. Валева А.А., Ремпель А.А. Получение стабильных наночастиц монооксида ниобия методом высокоэнергетического размола. Екатеринбург, Россия, 2014. / Valeeva A.A., Rempel' A.A. Poluchenie stabil'nykh nanochastits monooksida niobiya metodom vysokoenergeticheskogo razmola. Ekaterinburg, Russia, 2014. (In Russ.)
15. Park D., Mouche P.A., Zhong W., Han X., Heuser B.J., Mandapaka K.K. & Was G.S. STEM study of zircaloy 2 with FeCrAl layer under simulated BWR environment // *Transactions of the American Nuclear Society*. – 2016. – Vol. 114(1). – P. 1059–1060.
16. Benjamin R. Maier, Brenda L. Garcia-Diaz, Benjamin Hauch, Cold spray deposition of Ti<sub>2</sub>AlC coatings for improved nuclear fuel cladding // *Journal of Nuclear Materials*. – 2015. – Vol. 466. – P. 712–717. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2015.06.028>
17. Ece Alat, Arthur T. Motta, Robert J. Comstock, Jonna M. Partezana, Douglas E. Wolfe, Ceramic coating for corrosion (c3) resistance of nuclear fuel cladding, *Surface & Coatings Technology* (2015).



18. Fauzia Khatkhatay, Liang Jiao, Jie Jian, Wenrui Zhang, Superior corrosion resistance properties of TiN-based coatings on Zircaloy tubes in supercritical water // *Journal of Nuclear Materials*. – 2015.
19. Daub K., Van Nieuwenhove R., & Nordin H. Investigation of the impact of coatings on corrosion and hydrogen uptake of Zircaloy-4 // *Journal of Nuclear Materials*. – 2015. – Vol. 467. – P. 260–270. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2015.09.041>
20. Rezaee S., Rashed G. R., Golozar M. A. Electrochemical and oxidation behavior of yttria stabilized zirconia coating on zircaloy-4 synthesized via sol-gel process // *International Journal of Corrosion*. – 2013. – Vol. 2013.
21. Jin D. et al. A study of the zirconium alloy protection by Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr coating for nuclear reactor application // *Surface and Coatings Technology*. – 2016. – Vol. 287. – P. 55–60.
22. Ashcheulov P. et al. Thin polycrystalline diamond films protecting zirconium alloys surfaces: from technology to layer analysis and application in nuclear facilities // *Applied Surface Science*. – 2015. – Vol. 359. – P. 621–628.
23. Wiklund U. et al. Multilayer coatings as corrosion protection of Zircaloy // *Surface and Coatings Technology*. – 1996. – Vol. 86. – P. 530–534.
24. Kuprin A. S. et al. Vacuum-arc chromium-based coatings for protection of zirconium alloys from the high-temperature oxidation in air // *Journal of Nuclear Materials*. – 2015. – Vol. 465. – P. 400–406.
25. Kim T. et al. Phase transformation of oxide film in zirconium alloy in high temperature hydrogenated water // *Corrosion Science*. – 2015. – Vol. 99. – P. 134–144.
26. Mohammed N. Khan, Tariq Shamim. Investigation of a dual-stage high velocity oxygen fuel thermal spray system // *Applied Energy*. – 2014. – Vol. 130. – P. 853–862.
27. Pan C., et al. Microstructural Characteristics in Plasma Sprayed Functionally Graded ZrCh/N iCrAl Coatings // *Surface and Coatings Technology*. – 2003. – Vol. 162. – P. 194–201.
28. Jadidi M., Moghtadernejad S. and Dolatabadi A. Numerical Modeling of Suspension HVOF Spray // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2016. – Vol. 25. – P. 451–464.
29. Roman S. et al. The Evolution of Defects in Zirconium in the Process of Hydrogen Sorption and Desorption // *Key Engineering Materials*. – 2016. – Vol. 683.
30. Kim J.J., Kim H.G., Ryu H.J. High-temperature oxidation behaviors of ZrSi<sub>2</sub> and its coating on the surface of Zircaloy-4 tube by 3D laser printing, *Nuclear Engineering and Technology* (2020). <https://doi.org/10.1016/j.net.2020.02.018>
31. Li M, Christofides PD. Multi-scale modeling and analysis of an industrial HVOF thermal spray process. *Chem Eng Sci* 2005;60:3649–69. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2005.02.043>
32. Thiruvikraman C, Balasubramanian V, Sridhar K. Optimizing HVOF Spray Parameters to Maximize Bonding Strength of WC-CrC-Ni Coatings on AISI 304L Stainless Steel // *J Therm Spray Technol*. – 2014. – Vol. 23. – P. 860–75. <https://doi.org/10.1007/s11666-014-0091-4>
33. Emami S, Jafari H, Mahmoudi Y. Effects of Combustion Model and Chemical Kinetics in Numerical Modeling of Hydrogen-Fueled Dual-Stage HVOF System // *J Therm Spray Technol*. – 2019. – Vol. 28. – P. 333–45.
34. Khatami, S., Ilegbusi, O. and Trakhtenberg, L. (2015) Mathematical Modeling and Experimental Validation of Mixed Metal Oxide Thin Film Deposition by Spray Pyrolysis // *Materials Sciences and Applications*. – Vol. 6. – P. 68–77. <https://doi.org/10.4236/msa.2015.61009>
35. A. Valarezo, “Process Design for Reliable High Velocity Thermal Spray Coatings: An Integrated Approach through Process Maps and Advanced in situ Characterization”, Ph.D. Thesis, Stony Brook University, 2008.
36. Yan Y., Garrison B.E., Howell M., Bell G.L. High-temperature oxidation kinetics of sponge-based E110 cladding alloy // *J. Nucl. Mater.* – 2018. – Vol. 499. – P. 595–612.
37. Wei T., Zhang R., Yang H., Liu H., Qiu S., Wang Y., Du P., He K., Hu X., Dong C. Microstructure, corrosion resistance and oxidation behavior of Cr-coatings on Zircaloy-4 prepared by vacuum arc plasma deposition // *Corros. Sci.* – 2019. – Vol. 158. – P. 108077.
38. Bischoff J., Vauglin C., Delafoy C., Barberis P., Perche D., Guerin B., Vassault J., Brachet J. Development of Cr-coated zirconium alloy cladding for enhanced accident tolerance // *Proc. Top Fuel*. – 2016. – P. 1165–1171.
39. Picas J.A., Forn A. and Matthaus G. HVOF coatings as an Alternative to Hard Chrome for pistons and valves // *Wear*. – 2006. – Vol. 261. – P. 477–484.
40. H. Ruiz-Luna, D. Lozano-Mandujano, J.M. Alvarado-Orozco, A. Valarezo, C.A. Poblano-Salas, L.G. Trapaga-Martinez, F.J. Espinoza-Beltran, and J. Munoz-Saldana. Effect of HVOF Processing Parameters on the Properties of NiCoCrAlY Coatings by Design of Experiments // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2014.

Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr ЖАБЫНЫ ҮШІН HVOF ТЕРМИЯЛЫҚ БҮРКУ ПРОЦЕСІНІҢ  
ОҢТАЙЛЫ РЕЖИМДЕРІН ТЕОРИЯЛЫҚ ЗЕРТТЕУ ЖӘНЕ ШЕШУ

**Б. К. Рахадиллов<sup>1</sup>, Ш. Р. Курбанбеков<sup>1,3,4</sup>, Б. Сейтов<sup>1</sup>,  
Н. Муктанова<sup>2</sup>, Д. Э. Балтабаева<sup>3,4</sup>, К. Катпаева<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> С. Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті., Өскемен, Қазақстан

<sup>2</sup> Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті., Өскемен, Қазақстан

<sup>3</sup> Қ. А. Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті, Түркістан, Қазақстан

<sup>4</sup> «Инновациялық технологиялар және жаңа материалдар институты» ЖШС, Түркістан, Қазақстан

\* Байланыс үшін E-mail: dil.baltabaeva315@gmail.com

Мақалада цирконий субстратына арналған Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr негізіндегі жабынының теориялық зерттеулері қарастырылады. Бұл жабынды алу үшін ең тиімді әдістердің бірі болып табылатын жоғары жылдамдықты оттегі-отынмен термиялық тозандау (HVOF) әдісі зерттелді. Жабындарды алу қалыңдығы 3–5 мм, ұзындығы 20 мм, ені 30 мм болатын цирконий субстратының бетіне 600–700 м/с тозандау жылдамдығымен жүзеге асты. HVOF әдісімен тозандау кезіндегі температура шамамен 3000 °C, салқындату температурасы 27 °C құрайды. Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr жабынының теориялық деректерін зерттей отырып, карбидті жабындар үшін жабын қалыңдығы 0,6 мм-ден аспайтын Стоун әдісімен және Бреннер мен Сендерофф теңдеулерімен HVOF өңдеуден кейінгі дамып келе жатқан және жылу кернеулері анықталды. Теориялық зерттеулердің нәтижелері бойынша Kosaku Shinoda ұсынған әдіспен тұндыру тиімділігінің мәндері табылды. Теориялық және математикалық есептеулер бойынша цирконий субстратына жағылған Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr жабыны үшін тұндыру тиімділігі 59,5%–69,4% аралығында болды. Осылайша, жабындар үшін тұндыру тиімділігі субстраттың қалыңдығына, ұнтақты беру жылдамдығына, сондай-ақ қолданылатын материалдың массасына және сәйкесінше бүрку өтулерінің санына байланысты екендігі анықталды.

**Түйін сөздер:** HVOF, тұндыру тиімділігі, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr жабыны, цирконий, қалдық кернеу.

SPRAYING PROCESS FOR Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr COATING

**Б. К. Rakhadilov<sup>1</sup>, S. R. Kurbanbekov<sup>1,3,4</sup>, B. Seitov<sup>1</sup>,  
N. Mukanova<sup>2</sup>, D. E. Baltabayeva<sup>3,4\*</sup>, K. Katpayeva<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> S. Amanzholov East Kazakhstan University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

<sup>2</sup> D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

<sup>3</sup> International Kazakh-Turkish University named H.A. Yasavi, Turkestan, Kazakhstan

<sup>4</sup> LLP “Institute of Innovative Technologies and New Materials”, Turkestan, Kazakhstan

\* E-mail for contacts: dil.baltabaeva315@gmail.com

In this paper, the theoretical research of Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr coating for zirconia substrate is discussed. To obtain this coating, one of the multi-efficiency methods high velocity oxygen-fuel thermal spraying (HVOF) was investigated. The coatings were processed by different thicknesses of zirconia substrate sample of 3–5 mm also with length of 20 mm and width of 30 mm, at spraying speed of 600–700 m/s. The temperature during HVOF spraying is about 3000 °C and the cooling temperature is 27 °C. Investigating the theoretical data of Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr coatings, the development and thermal stresses after HVOF treatment were determined using Stone's method and Brenner-Senderoff equations with a coating thickness not exceeding 0.6 mm for carbide coatings. According to the results of theoretical research, the deposition efficiency values were found by the method proposed by Kosaku Shinoda. According to the theoretical and mathematical calculations, the deposition efficiency for Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr coating with zirconia substrate is in the range of 59.5%–69.4%. Thus, it was found that the deposition efficiency for the coatings depends on the thickness of the substrate, the powder feed rate, and the mass of the applied material and consequently the number of spraying passes.

**Keywords:** HVOF, deposition efficiency, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr coating, zirconia, residual stress.