

Ш.Р. Курбанбеков¹, Д.Р. Патчаханов*, С.Х. Камбарбеков², Б.С. Калдар¹

¹Международный казахско-турецкий университет имени Х.А. Ясави,
161200, Казахстан, Туркестан, ул. Б. Саттарханова, 29

²Восточно-Казахстанский университет имени Сарсена Аманжолова,
070016, Казахстан, Усть-Каменогорск, ул. 30-й Гвардейской Дивизии, 36
*e-mail: itsxxdi@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОКРЫТИЙ ZrCN ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПАРАМЕТРОВ HVOF-ПРОЦЕССА

Аннотация. В данном исследовании изучено влияние давления кислорода при высокоскоростном кислородно-топливном напылении (HVOF) на формирование и структурно-фазовые характеристики покрытий ZrCN, нанесённых на сталь 65Г. Покрытия получали на установке «Терміка-3» при фиксированных параметрах подачи топлива, воздуха и расстояния напыления, давление кислорода в диапазоне 4,0-4,5 бар. По результатам рентгенофазового анализа установлено, что основная матрица покрытий представлена твёрдым раствором Zr(C,N) с гранецентрированной кубической решёткой (Fm-3m). Повышение давления O₂ вызывает частичное термическое разложение ZrCN с образованием фаз ZrC, ZrN и оксидных соединений ZrO₂. Отмечено насыщение покрытия кислородом, измельчение зёрен и увеличение параметра решётки. Микротвёрдость покрытий (а-с) достигает 1512-1857 HV, что соответствует примерно пятикратному росту относительно исходного образца. На основании полученных данных показано, что регулирование давления кислорода в струе HVOF существенно влияет на фазовый состав, морфологию и качество адгезионных контактов, обеспечивая оптимальное сочетание твёрдости, пластичности и термостабильности.

Ключевые слова: HVOF, покрытие ZrCN, сталь 65Г, XRD, SEM.

Введение

Современные тенденции развития машиностроения и энергетического приборостроения требуют повышения износостойкости, коррозионной и термической стойкости рабочих поверхностей металлических деталей, эксплуатируемых в условиях интенсивных механических и химических воздействий. Одним из наиболее эффективных подходов к решению этой задачи является нанесение защитных покрытий на основе соединений переходных металлов, обладающих высокой твёрдостью, химической инертностью и стабильностью при повышенных температурах [1]. Среди таких соединений особое внимание привлекают карбонитриды, объединяющие свойства карбидов и нитридов и характеризующиеся уникальным сочетанием прочностных и эксплуатационных параметров [2].

Карбонитрид циркония (ZrCN) относится к классу тугоплавких соединений с гранецентрированной кубической структурой твёрдого раствора, в которой атомы углерода и азота изоморфно замещают друг друга в подрешётке анионов [3]. Такое строение обеспечивает высокую твёрдость (до 25-30 ГПа), модуль упругости порядка 400-450 ГПа и стойкость к термоокислительным процессам до температур 900-1000°C [4]. В отличие от индивидуальных нитридов и карбидов циркония, фаза Zr(C,N) обладает более высокой пластичностью и трещиностойкостью, что особенно важно для формирования покрытий на металлических подложках, склонных к различию коэффициентов термического расширения [5]. Благодаря совокупности этих свойств покрытия на основе ZrCN применяются для защиты режущего инструмента, деталей трения, клапанов, турбинных компонентов и других элементов, работающих в условиях абразивного и адгезионного износа [6].

В последние десятилетия широкое распространение получили физические и химические методы осаждения в вакууме – PVD и CVD, однако они характеризуются ограниченной производительностью и сравнительно низкой адгезией при нанесении на крупногабаритные детали [7]. Альтернативой им выступает технология напыления HVOF,

обеспечивающая сверхзвуковую скорость полёта частиц при умеренной температуре пламени [8]. Данный метод позволяет получать плотные, низкопористые покрытия с развитой межсплётной связностью и минимальной термической деградацией исходного порошка [9]. Особое значение при этом имеют параметры процесса – давления и расходы кислорода, топлива и воздуха, расстояние до подложки, а также кинематические характеристики движения горелки [10]. Именно совокупность этих факторов определяет температуру и скорость частиц в полёте, степень их расплющивания при ударе и, как следствие, морфологию, фазовый состав и адгезионную прочность покрытия [11].

Несмотря на многочисленные исследования, направленные на оптимизацию HVOF-процесса для различных карбидных и никелевых систем [12], вопросы влияния параметров горения и газодинамики на формирование фазового состава и микроструктуры ZrCN-покрытий остаются недостаточно изученными. В связи с этим актуальным является определение взаимосвязи между технологическими условиями HVOF-напыления – в первую очередь давлением кислорода – и структурно-фазовыми, трибологическими и физико-механическими характеристиками получаемых покрытий [13]. Полученные результаты представляют практическую ценность для разработки износостойких систем защиты стальных деталей, используемых в машиностроении, энергетике и инструментальном производстве.

Целью данной работы является изучение наноструктуры и физико-механических свойств нанокристаллических покрытий ZrCN, полученных методом HVOF.

Материалы и методы

Покрытия ZrCN были нанесены методом HVOF на установке оснащённой пультом управления, обеспечивающим точную настройку параметров подачи газов. На рисунке 1 приведены схема и внешний вид установки. При увеличении давления происходит интенсивное смешивание газовых потоков внутри камеры сгорания, после чего порошковый материал в строго дозированном объёме подаётся в горелку. Перемещение частиц к зоне распыления обеспечивается потоком сжатого воздуха, создаваемым компрессором, что способствует их равномерному поступлению и стабильности процесса напыления.

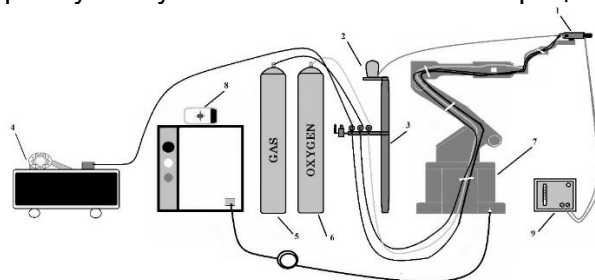


Рисунок 1 – Принципиальная схема установки для высокоскоростного напыления HVOF:

1 – горелка; 2 – дозатор порошка; 3 – панель управления газом; 4 – компрессор; 5 – газ в баллоне (C_3H_8); 6 – газ в баллоне (O_2); 7 – 6 осевой промышленный робот; 8 – контроллер; 9 – чиллер

После выхода из сопла горелки частицы порошка попадают в зону высокой температуры, где подвергаются интенсивному нагреву до состояния, обеспечивающего их размягчение и пластичную деформацию. В разогретом виде частицы с большой скоростью достигают предварительно подготовленной поверхности подложки, формируя плотный и равномерный слой покрытия. Применяемый порошок ZrCN с размером частиц 20-100 мкм имеет преимущественно неправильную полиэдрическую, фрагментированную морфологию, что, как известно, снижает его текучесть по сравнению со сферическими порошками. В качестве подложки использовалась сталь марки 65Г ГОСТ 14959-79, относящаяся к высокоуглеродистым легированным сталям, отличающимся высокой прочностью и износостойкостью, что делает их пригодными для нанесения защитных покрытий.

Химический состав стали 65Г представлен в таблице 1. Перед нанесением покрытия поверхность подложки подвергалась предварительной подготовке: сначала выполнялась механическая шлифовка для удаления оксидных плёнок и загрязнений, после чего проводилась пескоструйная обработка, направленная на повышение шероховатости и улучшение адгезии напыляемого слоя. Основные параметры процесса напыления приведены в таблице 2.

Таблица 1 – Химический состав стали 65Г [ГОСТ 14959-79]

Марка стали	Массовая доля элементов, %			
	Углерод	Кремний	Марганец	Хром
65Г	0,62-0,70	0,17-0,37	0,90-1,20	0,25

Таблица 2 – Параметры процесса нанесения покрытия ZrCN

№	Расстояние	Пропан	Давление воздуха	Кислород	Порошок
Образец а	35 см	3 бар	3,2 бар	4 бар	ZrCN
Образец б	35см	3 бар	3,2 бар	4,3 бар	ZrCN
Образец с	35см	3 бар	3,2 бар	4,5 бар	ZrCN

После завершения процесса напыления проведён комплекс исследований, направленных на всестороннюю оценку структуры, фазового состава и свойств сформированных покрытий. Структурно-фазовый и морфологический анализ позволил установить закономерности формирования фаз, микроструктуры и качества сцепления напылённого слоя с подложкой.

Микроструктурные исследования напылённых покрытий проводились методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на установке Tescan Vega 4, обеспечивающей как обзор микроструктуры поверхности, так и анализ поперечных шлифов.

Рентгенофазовый анализ выполнялся с использованием дифрактометра X'Pert PRO с применением медного излучения Cu-K α (длина волны $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$). Напряжение на трубке составляло 40 кВ, сила тока 30 мА. Съёмка проводилась в диапазоне углов $2\theta = 20-90^\circ$ с дискретностью 0.02° и временем накопления сигнала 2 с на шаг. Обработка дифрактограмм осуществлялась с использованием программного обеспечения High Score Plus с база данными PDF5+ (2026).

Результаты и обсуждения

На рисунке 2 представлены поперечные шлифы покрытий, сформированных при различных режимах HVOF-напыления. Верхний ряд изображений (SE) демонстрирует общую морфологию покрытия и границу раздела «покрытие-подложка», тогда как нижний ряд (BSE) показывает распределение контрастов, обусловленных различием химического состава и плотности фаз.

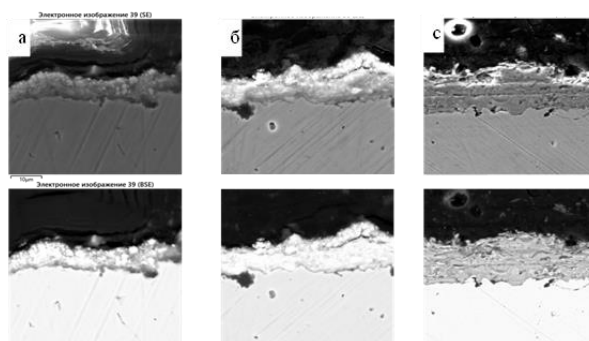


Рисунок 2 – СЭМ-изображения поперечных сечений ZrCN покрытий, полученных при различных скоростях кислородного потока
а) 4 бар; б) 4,3 бар; в) 4,5 бар

Покрытие образца (а) характеризуется заметной пористостью и неравномерной структурой вблизи границы с подложкой, что, вероятно, связано с переокислением частиц во время полёта и их частичным разложением в пламени. В образце (б) наблюдаются отдельные поры и зоны неоднородности, что может указывать на недостаточную кинетическую энергию частиц при их осаждении и неполное спекание ламелл. В то же время покрытие образца (с) отличается плотной, однородной структурой с минимальной пористостью и чётко выраженной границей раздела, что свидетельствует о качественном межфазном сцеплении и хорошей адгезии слоя к подложке.

Таким образом, наиболее оптимальная микроструктура наблюдается у образца, полученного при режиме (с), при котором достигается высокая плотность, равномерность и прочность покрытия. Подготовка поперечных образцов включала стадии горячего прессования, механического шлифования и последующего полирования с использованием

абразивных суспензий различной дисперсности. Данная методика обеспечила получение гладкой поверхности шлифа и позволила детально исследовать морфологию, межслойные границы и характер сцепления покрытия с подложкой с применением методов СЭМ-анализа.

Исследованное покрытие, сформированное методом высокоскоростного газопламенного напыления (HVOF), характеризуется существенно более высокой микротвёрдостью по сравнению с исходным материалом. Исходные значения микротвёрдости составляли около 392 HV. На рисунке 3 представлены результаты измерений микротвёрдости после нанесения покрытия. Согласно полученным данным, микротвёрдость покрытий (а-с) достигает 1512-1857 HV, что соответствует примерно пятикратному росту относительно исходного образца. Полученные результаты согласуются с литературными данными, согласно которым оптимизация параметров HVOF-напыления способствует формированию более плотной и однородной структуры покрытия с пониженной пористостью, что обеспечивает увеличение микротвёрдости и повышение эксплуатационных характеристик.

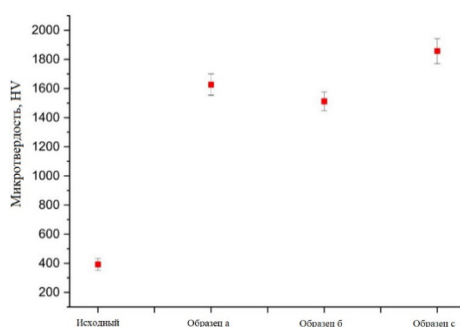


Рисунок 3 – График микротвёрдости ZrCN покрытий

На рисунке 4 представлены результаты рентгеновского дифрактометрического анализа исходного порошка, использованного для нанесения покрытий методом HVOF. По данным анализа установлено, что основной фазой исследуемого материала является карбонитрид циркония (ZrCN). Помимо этой фазы, в составе порошка выявлены также соединения карбида циркония (ZrC) и нитрида циркония (ZrN), что указывает на его многофазную структуру и частичное разложение исходного соединения.

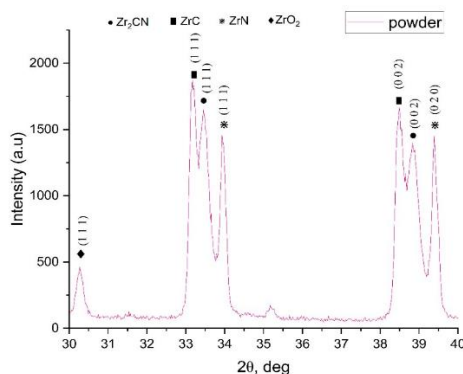


Рисунок 4 – Рентгенодифрактограмма исходного порошка ZrCN

Наличие фаз ZrC и ZrN подтверждает, что при производстве или последующей термической обработке порошка происходили процессы, приводящие к выделению отдельных компонентов твёрдого раствора. Дополнительно обнаружены слабые рефлекссы, соответствующие оксиду циркония (ZrO_2), что связано с незначительным окислением поверхности частиц при контакте с воздухом.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что порошковый материал представляет собой композицию взаимосвязанных карбонитридных и карбидных фаз, обеспечивающих сочетание высокой твёрдости, химической стабильности и термостойкости. Такая структурно-фазовая организация делает данный порошок перспективным для формирования плотных, износо- и термостойких покрытий методом HVOF.

Рентгенофазовые дифрактограммы трех образцов покрытий представлены на рисунке 5. Проведённый анализ рентгенограмм позволил установить, что в структуре исследованных покрытий формируются основные фазы Zr_2CN (ICDD: 98-061-8441), ZrC (ICDD: 98-061-9163) и ZrN (ICDD: 98-018-0847), которые являются характерными для систем на основе циркония, углерода и азота. Помимо них, в дифракционных спектрах обнаружены слабые пики, принадлежащие оксидным соединениям ZrO_2 (ICDD: 98-007-0014) и Fe (ICDD: 96-900-6596), что указывает на частичное окисление поверхности частиц при воздействии кислородосодержащей среды во время процесса напыления.

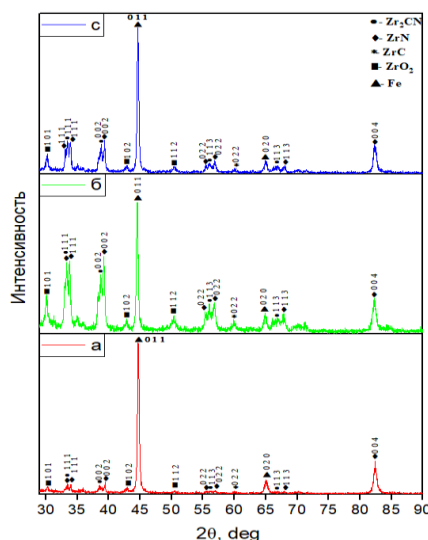


Рисунок 5 – Рентгенодифрактограммы $ZrCN$ покрытий, полученных при различных давлениях кислородного потока
а) 4 бар; б) 4,3 бар; в) 4,5 бар

Результаты рентгенофазового анализа свидетельствуют о том, что соединения Zr_2CN , ZrC и ZrN кристаллизуются в кубической сингонии с пространственной группой $Fm-3m$, что подтверждает образование твёрдого раствора на основе циркония. Подобная кристаллическая структура является устойчивой при высоких температурах и обеспечивает сочетание высокой твёрдости с хорошими механическими свойствами покрытий. Для большинства исследованных образцов зафиксировано незначительное смещение дифракционных максимумов относительно эталонных значений, что может быть связано с изменением параметра решётки вследствие варьирования соотношения углерода и азота, а также внедрения кислорода в кристаллическую структуру. Эти отклонения указывают на наличие внутренних напряжений и мелкозернистую природу материала, характерную для покрытий, формируемых при быстром охлаждении частиц после удара о поверхность подложки.

Формирование фаз ZrC и ZrN обусловлено термическим разложением исходного порошка $ZrCN$ в зоне высоких температур. При этом избыточное содержание кислорода в структуре ZrN может приводить к искажению кристаллической решётки, возникновению точечных дефектов и частичному аморфизму материала. Наличие кислорода вызывает уменьшение размера зёрен и увеличение параметра решётки, что подтверждается уширением дифракционных линий на рентгенограммах [13].

Следует отметить, что многие нитриды, включая ZrN , кристаллизуются в структурах типа $NaCl$ (гранцентрированная кубическая решётка). В идеальной упорядоченной кристаллической решётке для таких соединений комбинационное рассеяние первого порядка запрещено. Однако для напылённых покрытий, как правило, характерно наличие вакансий и других дефектов кристаллической структуры [14]. Эти несовершенства вызывают локальные искажения решётки, что приводит к появлению беспорядка и активации процессов рассеяния второго порядка.

Процесс напыления методом HVOF способствует формированию смеси кубической и тетрагональной модификаций оксида циркония. Однако при крайне быстром охлаждении расплавленных частиц в момент их осаждения на подложку доля кубической фазы

значительно увеличивается, так как не успевает произойти её превращение в тетрагональную. Это объясняется высокой скоростью теплового отвода и неравномерностью охлаждения в зоне осаждения частиц.

Появление фазы ZrO_2 имеющей кубическую решётку с пространственной группой $Fm-3m$, связано с особенностями газопламенного процесса. При высокоскоростном напылении использовалась газовая смесь пропана и кислорода, выполняющая роль окислительной среды. Такое сочетание условий привело к активному взаимодействию исходного соединения $ZrCN$ с кислородом и частичной потере углерода, в результате чего происходило образование оксидных структур. А также, фазовые превращения в системе $Zr-C-N-O$ при HVOF-напылении обусловлены как термодинамическими факторами, так и кинетикой окислительных процессов, определяемых температурой пламени и скоростью охлаждения частиц.

Помимо основных фаз, наличие пиков оксидов циркония и железа свидетельствует о локальных реакциях между материалом подложки и продуктами горения газовой смеси. Однако доля оксидных включений невелика, что говорит о правильном выборе параметров напыления и эффективном ограничении доступа кислорода в рабочую зону пламени. Таким образом, можно заключить, что процесс HVOF-осаждения обеспечивает формирование преимущественно кубической фазы твёрдого раствора $Zr(C,N)$ с минимальным количеством побочных соединений, а полученные рентгенографические результаты подтверждают стабильность структурно-фазового состояния покрытия при различных режимах напыления.

В исследованиях [15, 16] установлено, что покрытия на основе циркония обладают высокими показателями микротвёрдости и значительными значениями критических коэффициентов интенсивности. Помимо этого, важным достоинством данных покрытий является сравнительно высокая теплопроводность, которая способствует равномерному распределению тепла и тем самым снижает вероятность термических повреждений при эксплуатации [17].

Заключение

В ходе проведённых исследований было установлено, что наилучшие эксплуатационные свойства покрытий $ZrCN$ достигаются при использовании режима HVOF-напыления с давлением кислорода 4,5 бар (образец с). Данный режим можно считать оптимальным, поскольку он обеспечивает формирование покрытия с наиболее благоприятной комбинацией структурных и механических характеристик. При этом наблюдается образование равномерного, плотного и однородного слоя без выраженных дефектов, трещин и пористости. Микроструктура покрытия характеризуется плотной ламеллярной укладкой частиц, хорошей связностью между отдельными расплюснутыми элементами и минимальным количеством межламеллярных пустот, что способствует повышению адгезии и износостойкости.

Фазовый анализ показал, что при данном режиме напыления преимущественно формируются карбонитридные соединения типа $Zr(C,N)$, которые кристаллизуются в гранецентрированной кубической решётке. Такая структура является устойчивой и обеспечивает сочетание высокой твёрдости, пластичности и стабильности при воздействии термомеханических нагрузок.

Таким образом, полученные результаты подтверждают, что микроструктурное состояние и фазовая стабильность $ZrCN$ -покрытий существенно зависят от содержания кислорода и параметров термического воздействия в процессе HVOF-напыления.

Список литературы

1. Microstructure and Mechanical Properties of ZrN , $ZrCN$ and ZrC Coatings Grown by Chemical Vapor Deposition / F. Frank et al // Coatings. – 2021. – № 11(5). – P. 491. <https://doi.org/10.3390/coatings11050491>.
2. Shishkin R.A. The study of physico-chemical transformations in the process of low-temperature synthesis of zirconium carbide / R.A. Shishkin, V.S. Kudyakova, N.V. Zhirenkina // NOVYE OGNEUPORY (NEW REFRACTORIES). – 2019. – № 2. – P. 45-48. <https://doi.org/10.17073/1683-4518-2019-2-45-48>.
3. Electrochemical performance of $TiCN$ coatings with low carbon concentration in simulated body fluid / Q. Wang et al // Surf. Coat. Technol. – 2014. – № 253. – P. 199-204. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.05.037>.

4. Improving the Efficiency of Air Plasma Spraying of Titanium Nitride Powder / A. Kengesbekov et al // Coatings. – 2022. – № 12(11). – 1644. <https://doi.org/10.3390/coatings12111644>.
5. Preparation and Characterization of NiCr/NiCr-Al₂O₃/Al₂O₃ Multilayer Gradient Coatings by Gas Detonation Spraying / B. Rakhadilov et al // Coatings. – 2021. – № 11(12). – P. 1524. <https://doi.org/10.3390/coatings11121524>.
6. Development and Studying of the Technology for Thermal Spraying of Coatings Made from Ultra-High-Molecular-Weight Polyethylene / M. Skakov et al // Coatings. – 2023. – № 13(4). – P. 698. <https://doi.org/10.3390/coatings13040698>.
7. Oksa M. Nickel- and iron-based HVOF thermal spray coatings for high temperature corrosion protection in biomass-fired power plant boilers / M. Oksa // Dissertation. Aalto University, 2015. <https://publications.vtt.fi/pdf/science/2015/S74.pdf>.
8. Tan J.C. Optimisation of the HVOF thermal spray process for coating, forming and repair of components. Doctoral dissertation, Dublin City University, 1997.
9. Процессы формирования газотермических покрытий и их моделирование. Минск: Беларус. наука, 2011. – 357 с.
10. Harrison R. Processing and Characterisation of ZrCxNy Ceramics as a Function of Stoichiometry via Carbothermic Reduction-Nitridation / R. Harrison // Doctoral dissertation, Imperial College London, 2015.
11. Larijani M.M. The effect of carbon fraction in Zr(C,N) films on the nano-structural properties and hardness / M.M. Larijani, M.B. Zanzanbar, A. Majdabadi // Journal of Alloys and Compounds. – 2010. – № 492(1-2). – P. 735-738.
12. Матренин С.В. Структура и физико-механические свойства керамики на основе ZrCN / С.В. Матренин, Е.Д. Кузьменко // Инновационные технологии в машиностроении: сб. трудов XV Международной научно-практической конференции. Томск: ТПУ, 2024. С. 13-15.
13. Carbides of transition metals: Properties, application and production. Review / Yu.L. Krutskii et al // Part 2. Chromium and zirconium carbides. Izvestiya. Ferrous Metallurgy. – 2023. – № 66(4). – P. 445-458. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-4-445-458>.
14. Ul-Hamid A. Synthesis, microstructural characterization and nanoindentation of Zr, Zr-nitride and Zr-carbonitride coatings deposited using magnetron sputtering / A. Ul-Hamid // Journal of Advanced Research. – 2021. – № 29. – P. 107-119.
15. Марков Ю.М. Получение карбонитрида циркония в режиме СВС-Аз / Ю.М. Марков // Современные материалы, техника и технологии. – 2017. – № 6 (14). – P. 88-93.
16. Матренин С.В. Структура и физико-механические свойства керамики на основе ZrCN / С.В. Матренин, Е.Д. Кузьменко // Инновационные технологии в машиностроении: сборник трудов XV Международной научно-практической конференции, г. Юрга, 23-25 мая 2024 г. – P. 13-15.

References

1. Microstructure and Mechanical Properties of ZrN, ZrCN and ZrC Coatings Grown by Chemical Vapor Deposition / F. Frank et al // Coatings. – 2021. – № 11(5). – R. 491. <https://doi.org/10.3390/coatings11050491>. (In English).
2. Shishkin R.A. The study of physico-chemical transformations in the process of low-temperature synthesis of zirconium carbide / R.A. Shishkin, V.S. Kudyakova, N.V. Zhirenkina // NOVYE OGNEUPORY (NEW REFRACTORIES). – 2019. – № 2. – R. 45-48. <https://doi.org/10.17073/1683-4518-2019-2-45-48>. (In English).
3. Electrochemical performance of TiCN coatings with low carbon concentration in simulated body fluid / Q. Wang et al // Surf. Coat. Technol. – 2014. – № 253. – R. 199-204. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.05.037>. (In English).
4. Improving the Efficiency of Air Plasma Spraying of Titanium Nitride Powder / A. Kengesbekov et al // Coatings. – 2022. – № 12(11). – 1644. <https://doi.org/10.3390/coatings12111644>. (In English).
5. Preparation and Characterization of NiCr/NiCr-Al₂O₃/Al₂O₃ Multilayer Gradient Coatings by Gas Detonation Spraying / B. Rakhadilov et al // Coatings. – 2021. – № 11(12). – R. 1524. <https://doi.org/10.3390/coatings11121524>. (In English).
6. Development and Studying of the Technology for Thermal Spraying of Coatings Made from Ultra-High-Molecular-Weight Polyethylene / M. Skakov et al // Coatings. – 2023. – № 13(4). – R. 698. <https://doi.org/10.3390/coatings13040698>. (In English).

7. Oksa M. Nickel- and iron-based HVOF thermal spray coatings for high temperature corrosion protection in biomass-fired power plant boilers / M. Oksa // Dissertation. Aalto University, 2015. <https://publications.vtt.fi/pdf/science/2015/S74.pdf>. (In English).
8. Tan J.C. Optimisation of the HVOF thermal spray process for coating, forming and repair of components. Doctoral dissertation, Dublin City University, 1997. (In English).
9. Protsessy formirovaniya gazotermicheskikh pokrytii i ikh modelirovanie. Minsk: Belarus. nauka, 2011. – 357 s. (In Russian).
10. Harrison R. Processing and Characterisation of ZrCxNy Ceramics as a Function of Stoichiometry via Carbothermic Reduction-Nitridation / R. Harrison // Doctoral dissertation, Imperial College London, 2015. (In English).
11. Larijani M.M. The effect of carbon fraction in Zr(C,N) films on the nano-structural properties and hardness / M.M. Larijani, M.B. Zanjani, A. Majdabadi // Journal of Alloys and Compounds. – 2010. – № 492(1-2). – R. 735-738. (In English).
12. Matrenin S.V. Struktura i fiziko-mekhanicheskie svoistva keramiki na osnove ZrCN / S.V. Matrenin, E.D. Kuz'menko // Innovatsionnye tekhnologii v mashinostroenii: sb. trudov XV Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. Tomsk: TPU, 2024. S. 13-15. (In Russian).
13. Carbides of transition metals: Properties, application and production. Review / Yu.L. Krutskii et al // Part 2. Chromium and zirconium carbides. Izvestiya. Ferrous Metallurgy. – 2023. – № 66(4). – R. 445-458. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-4-445-458>. (In English).
14. Ul-Hamid A. Synthesis, microstructural characterization and nanoindentation of Zr, Zr-nitride and Zr-carbonitride coatings deposited using magnetron sputtering / A. Ul-Hamid // Journal of Advanced Research. – 2021. – № 29. – R. 107-119. (In English).
15. Markov YU.M. Poluchenie karbonitrida tsirkoniya v rezhime SVS-Az / YU.M. Markov // Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii. – 2017. – № 6 (14). – R. 88-93. (In Russian).
16. Matrenin S.V. Struktura i fiziko-mekhanicheskie svoistva keramiki na osnove ZrCN / S.V. Matrenin, E.D. Kuz'menko // Innovatsionnye tekhnologii v mashinostroenii: sbornik trudov XV Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, g. Yurga, 23-25 maya 2024 g. – R. 13-15. (In Russian).

Благодарности

Данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP22787358).

Ш.Р. Курбанбеков¹, Д.Р. Патчаханов*, С.Х. Камбарбеков², Б.С. Қалдар¹

¹Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті,
161200, Қазақстан, Түркістан, Б. Саттарханов көшесі, 29

²Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті,
070016, Қазақстан, Өскемен, 30-Гвардиялық дивизия көшесі, 36

*e-mail: itsxxdi@gmail.com

ZRCN ЖАБЫНДАРЫНЫҢ ҚҰРЫЛЫМДЫҚ-ФАЗАЛЫҚ СИПАТТАМАЛАРЫН HVOF-ПРОЦЕСІНІҢ ПАРАМЕТРЛЕРІНІҢ ӘСЕРІМЕН ЗЕРТТЕУ

Бұл зерттеу жұмысында жоғары жылдамдықты оттегі-отынды бүрку (HVOF) әдісімен алынған ZrCN жабындарының құрылымдық-фазалық сипаттамаларына оттегі қысымының әсері қарастырылды. Жабындар 65Г болатының бетіне «Терміка-3» қондырғысында отын, ауа және бүрку арақашықтығының тұрақты параметрлерін сақтай отырып, оттегі қысымын 4,0-4,5 бар аралығында өзгерту арқылы алынды. Рентгенофазалық талдау нәтижесінде жабындардың негізгі матрицасы гранецентрлі кубтық торлы (Fm-3m) Zr(C,N) қатты ерітіндісінен тұратыны анықталды. Оттегі қысымының артуы ZrCN қосылысының ішінара термиялық ыдырауына және ZrC, ZrN фазаларының, сондай-ақ ZrO₂ оксидтік қосылыстарының түзілуіне алып келеді. Жабын құрылымында оттегінің қанығуы, түйіршіктердің майдалануы және тор параметрінің ұлғаюы байқалды. (А-с) жабындарының микроқаттылығы 1512-1857 HV деңгейіне дейін жетеді, бұл бастапқы үлгімен салыстырғанда шамамен бес есе артуға сәйкес келеді. Алынған нәтижелер HVOF процесіндегі оттегі қысымын реттеу жабындардың фазалық құрамы мен морфологиясына, сондай-ақ адгезиялық байланыстардың сапасына айтарлықтай әсер ететінін көрсетті. Бұл өз кезегінде жабындардың қаттылығы, пластикалығы және термиялық тұрақтылығының оңтайлы үйлесіміне қол жеткізуге мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: HVOF, ZrCN жабын, 65Г болат, XRD, SEM.

Sh.R. Kurbanbekov¹, D.R. Patchakhanov*, S.Kh. Kambarbekov², B.S. Kaldar¹

¹Khoja Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University,
161200, Kazakhstan, Turkestan, B. Sattarkhanova str., 29

²Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University,
070016, Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk, 30th Guards Division Street, 36

*e-mail: itsxxdi@gmail.com

STUDY OF STRUCTURAL-PHASE CHARACTERISTICS OF ZrCN COATINGS UNDER THE INFLUENCE OF HVOF PROCESS PARAMETERS

This study investigates the effect of oxygen pressure during high-velocity oxy-fuel (HVOF) spraying on the formation and structural-phase characteristics of ZrCN coatings deposited on 65G steel. The coatings were produced using the Termika-3 system under fixed parameters of fuel, air flow, and spray distance, with oxygen pressure varied in the range of 4.0-4.5 bar. X-ray diffraction analysis revealed that the main coating matrix consists of a Zr(C,N) solid solution with a face-centered cubic lattice (Fm-3m). Increasing the O₂ pressure leads to partial thermal decomposition of ZrCN and the formation of ZrC, ZrN, and oxide phases such as t-ZrO₂. Oxygen enrichment of the coatings results in grain refinement and lattice parameter expansion. The microhardness of the coatings (a-c) reaches 1512-1857 HV, which corresponds to an approximately fivefold increase relative to the initial sample. Based on the obtained results, it was shown that regulating the oxygen pressure in the HVOF jet significantly affects the phase composition, morphology, and adhesion quality, providing an optimal combination of hardness, ductility, and thermal stability.

Key words: HVOF, ZrCN coating, 65G steel, XRD, SEM.

Сведения об авторах

Шерзод Рустамбекович Курбанбеков – директор НИИ «Естественные науки, нанотехнологии и новые материалы» Международный казахско-турецкий университет имени Ходжи Ахмета Яссави, г. Туркестан, Казахстан; e-mail: sherzod.kurbanbekov@ayu.edu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5510-0568>.

Дияр Равшанұлы Патчаханов* – Международный казахско-турецкий университет имени Ходжи Ахмета Яссави, кафедра физики, студент, г. Туркестан, Казахстан; e-mail: itsxxdi@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-4153-0874>.

Сардор Хуснутдинович Камбарбеков – докторант 1-го курса Восточно-Казахстанского университета имени С. Аманжолова; e-mail: sardor.kambarbekov@ayu.edu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-6794-1281>.

Берик Калдар – младший научный сотрудник Научно-исследовательского института естественных наук, нанотехнологий и новых материалов; e-mail: berik.kaldar@ayu.edu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-9267-7029>.

Авторлар туралы мәліметтер

Шерзод Рустамбекович Курбанбеков – Жаратылыстану ғылымдары, нанотехнологиялар және жаңа материалдар ҒЗИ директоры, Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті, Түркістан қ., Қазақстан; e-mail: sherzod.kurbanbekov@ayu.edu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5510-0568>

Дияр Равшанұлы Патчаханов – Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті, Физика кафедрасы, студент, Түркістан қ., Қазақстан; e-mail: itsxxdi@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-4153-0874>.

Сардор Хуснутдинович Камбарбеков – С. Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университетінің 1-курс докторанты; e-mail: sardor.kambarbekov@ayu.edu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-6794-1281>.

Берік Калдар – «Жаратылыстану ғылымдары, нанотехнология және жаңа материалдар» ғылыми-зерттеу институтының кіші ғылыми қызметкері; e-mail: berik.kaldar@ayu.edu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-9267-7029>.

Information about the authors

Sherzod Rustambekovich Kurbanbekov – Director of the SRI «Natural Sciences, Nanotechnology and New Materials», Khoja Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University, Turkestan, Kazakhstan; e-mail: sherzod.kurbanbekov@ayu.edu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5510-0568>.

Diyar Ravshanuly Patchakhanov* – International Kazakh-Turkish University named after Khoja Akhmet Yasawi, Department of Physics, student, Turkestan, Kazakhstan; e-mail: itsxxdi@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-4153-0874>.

Sardor Khusnutdinovich Kambarbekov – First-year doctoral student at S. Amanzholov East Kazakhstan University; e-mail: sardor.kambarbekov@ayu.edu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-6794-1281>.

Berik Kaldar – Junior Researcher at the Research Institute of Natural Sciences, Nanotechnology, and New Materials; e-mail: berik.kaldar@ayu.edu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-9267-7029>.

Поступила в редакцию 05.01.2026

Поступила после доработки 18.02.2026

Принята к публикации 19.02.2026

[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1\(21\)-60](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-60)



FTAXP: 44.31.35

М.Қ. Жамбаева*, О.А. Степанова¹, А.Б. Касымов¹, М.В. Ермоленко¹, К.С. Астемесова²

¹Шөкәрім университеті,

071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинка көшесі, 20А

²Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті,

050043, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Сәтпаев көшесі 22

*e-mail: zhambaeva_94@mail.ru.

МЕТАЛДАРДЫ КЕСУДЕГІ MQL ЖАҒДАЙЫНДА МАЙЛАУ-СУЫТУ СҰЙЫҚТЫҚТАРЫНЫҢ ЖЫЛУФИЗИКАЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІН ОҢТАЙЛАНДЫРУ

Аңдатпа: Мақалада металдарды механикалық өңдеу кезінде минималды мөлшерде майлау (MQL) технологиясын қолдану арқылы қолданылатын майлау-суыту сұйықтықтардың (MCC) және наномодификацияланған майлардың жылуфизикалық қасиеттеріне арналған заманауи зерттеулерге шолу ұсынылған. Мақалада майлы, суды және эмульсиялық негіздегі негізгі MCC түрлері, олардың жылуфизикалық сипаттамалары және металдарды қарқынды кесу кезінде эксплуатация талаптары қарастырылған.

Арнайы назар әртүрлі нанобөлшектерді (Al_2O_3 , TiO_2 , SiO_2 , ZnO , графен т.б.) қосудың MCC жылуөткізгіштік қасиеттерін арттыруға, үйкелісті, тұтқырлықты, тығыздықты және жылу сыйымдылығын төмендетуге әсеріне аударылған. Жарияланымдарды талдау наномодификацияланған MCC және MQL технологиясын зерттеуге мүмкіндік берді.

Зерттеу нәтижелері наномодификацияланған MCC қолдану жылу алмасу қарқындылығын арттырып, кесу құралының тозуын төмендететінін және MCC шығынын оңтайландыру арқылы өңдеу тиімділігін арттыруға мүмкіндік беретінін көрсетті. Сонымен қатар, жылуөткізгіштік пен тұтқырлық көрсеткіштерін оңтайландыру мақсатында MCC құрамы мен нанобөлшектер концентрациясын реттеу қажеттілігі көрсетілген.

Мақала MQL технологиясы жағдайында наномодификацияланған MCC-ны әрі қарай зерттеуге және практикалық қолдануға негіз болып табылады, бұл металдарды өңдеудің энергия тиімді және экологиялық қауіпсіз процестерін дамытуға ықпал етеді және өнеркәсіптік өндірісте кеңінен енгізілуіне мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: майлау-суыту сұйықтық (MCC), минималды мөлшерде майлау (MQL), өсімдік майлары, нано-сұйықтықтар, механикалық өңдеу, құралдың тозуы.

Кіріспе

Металдарды өңдеу технологияларын жетілдіру және энергия үнемдейтін, экологиялық қауіпсіз кесу әдістерін енгізу жағдайында кесу аймағында тиімді жылу шығарудың және үйкелісті төмендетудің рөлі арта түседі. Осыған байланысты металдарды механикалық өңдеуде қолданылатын майлау-суыту сұйықтықтарға (MCC) жоғары талаптар қойылады, ең алдымен олардың жылуфизикалық сипаттамаларына, тұтқырлығына, эксплуатациялық сенімділігіне және энергия тиімділігіне.

Дәстүрлі көлемдік берілетін MCC әрдайым құралдың тозуын азайтып, оптималды салқындату жағдайларын қамтамасыз ете алмайды, әсіресе кесу жылдамдығы жоғары және сұйықтық шығыны минималды болған жағдайда. Сонымен қатар, металдарды қарқынды кесу