

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2023-1-4-14>

УДК 621.793.71

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ HVOF ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ WC – ОБЗОР

Б.К. Рахадиллов¹⁾, Н. Муктанова²⁾, Л.Г. Журерова¹⁾

¹⁾ *Восточно-Казахстанский университет им. С. Аманжолова, Усть-Каменогорск, Казахстан*

²⁾ *Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан*

E-mail для контактов: rakhadilovb@mail.ru

В статье приведены основные проблемы износа и срока эксплуатации шибберных задвижек для магистрального трубопроводного транспорта нефтяной и газовой промышленности. Одним из возможных способов решения этих проблем является нанесение тонкого слоя износостойких и коррозионностойких покрытий. В связи с постоянно растущей стоимостью материалов, а также возросшими требованиями к материалам в последнее время все большее значение придается методам нанесения покрытий. Среди газотермических методов нанесения покрытий технология высокоскоростного кислородно-топливного напыления (HVOF) является новой и быстро развивающейся технологией, которая позволяет получать покрытия высокой плотности с пористостью менее 1%, обладающие повышенной твердостью и адгезией, а также улучшенными свойствами эрозии, коррозии и износостойкости. В этой обзорной статье проведен сравнительный обзор характеристик карбидных покрытий, полученных с использованием различных технологий напыления.

Ключевые слова: WC-Co-Cr покрытия, технология HVOF, износостойкость, адгезия, коррозионная стойкость, термическое напыление.

1. ВВЕДЕНИЕ

Одной из главных технических задач транспортировки нефти и нефтепродуктов является создание высокоорганизованной системы коммуникаций трубопроводного транспорта, обеспечивающего высокую надежность и полную экологическую безопасность. Это можно обеспечить созданием и изготовлением качественной трубопроводной арматуры и других элементов системы трубопроводного транспорта применением высокопрочных и износостойких материалов.

В Республике Казахстан производством трубопроводной арматуры занимаются крупные заводы, такие как: акционерное общество «Усть-Каменогорский арматурный завод» (город Усть-Каменогорск), товарищество с ограниченной ответственностью «Завод Казахстанская Арматура» (город Темиртау), акционерное общество «Усть-Каменогорский завод промышленной арматуры» (город Усть-Каменогорск), товарищество с ограниченной ответственностью «Павлодарский завод трубопроводной арматуры» (город Павлодар), Атырауский завод трубопроводной арматуры (город Атырау). Потребителями выпускаемых в Республике Казахстан трубопроводной арматуры, в том числе задвижек (шибберные, клиновые и затворы обратные), являются крупнейшие энергодобывающие, нефтеперерабатывающие и металлургические предприятия Республики Казахстан и Содружества Независимых Государств [1].

Одной из технических задач вышеуказанных заводов является повышение надежности и долговечности шибберных задвижек. Задвижки являются одним из важных элементов в транспортировке нефти и газа, в процессе добычи от скважины и по сложной

сети трубопроводов, определяя условия безопасной эксплуатации и защиты окружающей среды.

Интенсификация производства и повышение конкурентоспособности отечественных изделий требует применения современных материалов, обладающих улучшенными физико-химическими свойствами. Однако, отечественные заводы по производству трубопроводной арматуры, а именно шибберных задвижек, все еще применяют традиционные и устаревшие технологии наплавки и нанесения покрытий, которые не обеспечивают высокие трибологические и коррозионные характеристики узла затвор-седло.

Например, Усть-Каменогорский арматурный завод применяет технологию электродуговой наплавки дисперсионно-твердеющей сталью типа 10X17H87C5Г2Т уплотнительных поверхностей деталей затвора тяжелой сварной нефтяной трубопроводной арматуры. Однако, данный метод не обеспечивает высоких механических и трибологических характеристик поверхности. Поэтому, в условиях Усть-Каменогорского арматурного завода для повышения износостойкости наплавленного материала из 10X17H8C5Г2Т применяется ультразвуковая упрочняющая финишная обработка, которая позволяет одновременно повысить поверхностную твердость наплавленного металла, класс шероховатости поверхностей и создать антифрикционный поверхностный слой. Тем не менее, и данная комбинированная технология не обеспечивает срок службы шибберных задвижек на уровне импортных и является экономически нецелесообразной. Поэтому данный завод в настоящее время широко применяет для повышения срока службы шибберных задвижек технологию гальванического хромирования, которая является эко-

гический вредной. В развитых странах сегодня существуют жесткие ограничения на процессы с эмиссией шестивалентного хрома [2].

А другие заводы Казахстана все еще не освоили и не внедрили технологии наплавки или напыления при производстве деталей шибберных задвижек. Например, АО «Усть-Каменогорский завод промышленной арматуры» производит малогабаритные шибберные задвижки без применения поверхностной обработки (наплавка или напыление), что делает их менее конкурентоспособными по сравнению с импортными продуктами [3].

Как известно из работ С.С. Полоскова, С.А. Тукова, М.В. Корчагина, С.О. Киреева [4–5], в процессе эксплуатации компоненты арматуры, используемой в нефтяной промышленности, подвергаются интенсивному эрозионному и коррозионному износу, что приводит к резкому снижению их долговечности. Эрозия и коррозия задвижек, используемых в нефтедобывающей промышленности, является серьезной проблемой. Это связано с тем, что взвешенные частицы песка в потоке нефти и газа вызывают эрозию некоторых критических компонентов, таких как задвижки и седловые кольца, что приводит к значительным эксплуатационным расходам. С другой стороны, коррозия этих компонентов из-за хлоридов, сульфидов и других примесей в сырой нефти и газе также может привести к утечкам и преждевременным отказам. Чтобы противостоять сочетанию трения и износа, на затворах и седлах используются различные покрытия и способы обработки поверхности. Они включают твердое хромирование, электролитическое никелирование, конверсионные покрытия, диффузионную обработку, термическое напыление покрытий и наплавку сварных швов. Среди них термическое напыление является одним из наиболее эффективных методов с точки зрения мировой практики и современным аналогом вышеизложенных методов [6].

Согласно источникам [7–9] установлено, что с помощью различных методов термического напыления, таких как воздушно-плазменное напыление (APS), вакуумное плазменное напыление (VPS), детонационный пистолет, дуговое напыление, пламенное напыление и высокоскоростное кислородное напыление (HVOF) наносятся в основном покрытия на основе керамики-металлического композита (керметы), в частности карбид-вольфрам-кобальт WC-Co, карбид-вольфрам-кобальт-хром WC-Co-Cr, а также хром-карбид-никель-хром Cr₃C₂-NiCr [10–13]. Однако процесс HVOF получил признание за свои преимущества, включая меньшую пористость, уменьшение реакций разложения, более высокую степень сохранения карбида вольфрама (WC), и лучшую адгезию между карбидом вольфрама (WC) и металлической связующей фазой [14–20].

В мире существует не более десятка компаний, изготавливающих промышленные горелки для

HVOF. Одной из них является ООО «ИндМет», базирующаяся в г. Санкт-Петербург (Российская Федерация). Одним из приоритетных направлений ее деятельности является выполнение выездных работ на территории заказчика по восстановлению или изменению геометрии изношенных поверхностей с помощью метода Kermetico HVOF. Преимущество этого метода заключается в его компактности и способности свободно транспортироваться в нужное место. Такое преимущество символизирует его современное состояние [21].

Установку HVOF Termika-3 производит научно-производственная фирма «Плазмацентр» (г. Санкт-Петербург, Российская Федерация). Современная аппаратная база фирмы достаточно обширна, она выпускает не только HVOF Termika-3 для напыления, но и большое количество оборудования для плазменной сварки, наплавки, закалки и упрочнения. В настоящее время в Казахстане существует только одна научно-производственная фирма, использующая технологию HVOF Termika-3 и являющаяся официальным дистрибьютором научной производственной фирмы «Плазмацентр», это ТОО «PlasmaScience» [22, 23]. В дальнейшем на этой базе будут выполняться все исследовательские работы авторов, связанные с технологией HVOF. Преимуществом данной технологии HVOF Termika-3 перед другими аналогами является свободная транспортировка в нужное место, наличие специальных сменных горелок для напыления внутренних и наружных поверхностей, простота принципа работы технологии (см. раздел 2), хорошие характеристики напыляемого покрытия.

Существует несколько аппаратных баз нанесения покрытий методом HVOF. Например:

- компания ООО «Servis Armatur» (Чешская Республика) использует технологию, состоящую из американской системы HP/HVOF JP-5000, которая позволяет очень точно напылять цилиндрические и шарообразные поверхности [24];

- компания ООО «Сабарос» (г. Москва, Российская Федерация) производит технологию, состоящую из Нидерландской системы HP/HVOF JP-5000, JetKote, Diamond Jet, FX-5, которая создает покрытия с высокой адгезией и позволяет напылять очень толстые покрытия [25].

Все виды технологии HVOF в вышеуказанных компаниях используют единый принцип создания сверхзвуковых течений газового пламени и имеют только конструктивные особенности, в основном, связанные с получением разной скорости и температуры газопорошковой смеси, условиями охлаждения, отличающиеся производительностью напыления. Технология HVOF в основном напыляет материалы, на основе карбидов, обладающих высокими эксплуатационными характеристиками, такие как высокая стойкость к абразивному, эрозионному и кавитационному износу [26–28]. Благодаря таким характери-

стикам карбидосодержащие композиты хорошо рекомендовали себя как износо- и эрозионно-стойкие покрытия во многих отраслях промышленности, таких как аэрокосмическая и морская (шасси самолетов, пропеллеры, газовые турбины, гидравлические приводы), бурение нефтяных и газовых скважин, резка металла, горнодобывающая промышленность, обработка металлов давлением, целлюлозно-бумажная промышленность, геотермальная энергетика, производство электроэнергии (газовые турбины) и морские сооружения [29–31].

Таким образом, целью настоящей обзорной статьи является анализ исследований ученых в области нанесения защитных или комбинированных порошковых покрытий на шибберные задвижки с использованием метода напыления HVOF для улучшения физико-механических и трибологических характеристик поверхности материала.

2. ПРОГРЕСС В ИЗУЧЕНИИ СВОЙСТВ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ КАРБИДА ВОЛЬФРАМА, НАПЫЛЕННЫХ МЕТОДОМ HVOF И СРАВНЕНИЯ ИХ С ДРУГИМИ МЕТОДАМИ

2.1 Механические и физические характеристики покрытий

В области обработки поверхностей, термическое напыление является хорошо известным методом, используемым для нанесения различных типов защитных покрытий, которые используются во многих отраслях промышленности [32]. В зависимости от области применения могут быть выбраны различные способы изготовления покрытия: пламя, дуга, плазма или холодное напыление [10, 33–36]. Среди них высокоскоростное кислородно-топливное напыление (HVOF) является основным методом, используемым для нанесения твердого, износостойкого покрытия, которое также обладает коррозионной и эрозионной стойкостью [37, 38]. В этом методе расплавленные или полурасплавленные частицы порошка напыляются на поверхность подложки высокоскоростным (до 700 м/с) и высокотемпературным газовым (до 3000 °C) потоком. Принцип HVOF заключается в том, что горючие газы большого объема подаются в камеру сгорания. Сгорание происходит внутри при очень высоком давлении. Затем они подаются в длинное ограничивающее сопло или цилиндр, через которые выходят из устройства, создавая сверхзвуковую газовую струю с очень высокими скоростями частиц. Частицы порошка вводятся в поток, нагреваются и направляются к подложке, на которой формируется покрытие (см. рисунок 1). При такой высокой скорости, частицы имеют меньшее время пребывания в высокотемпературной газовой среде, что позволяет получать покрытия с очень низкой пористостью, низким коэффициентом окисления, а также высокой адгезией к подложке [39].

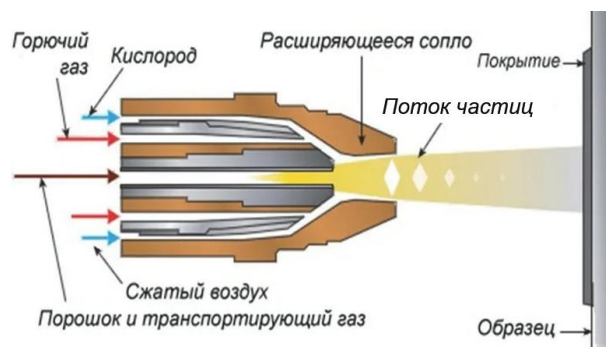


Рисунок 1. Схематическое представление метода HVOF и его основные параметры напыления [33, 40]

На сегодняшний день технология HVOF считается современным аналогом HVAF. Они отличаются используемыми газами, горелками и получаемыми результатами. В работе [41] авторов Abdullahi K. Gujba, Mohammed S. Mahdipoor, Mamoun Medraj покрытие WC-10Co-4Cr было нанесено методами HVOF и HVAF, исследованы их микроструктура и свойства. Оба метода нанесли толстые покрытия WC-10Co-4Cr на Ti-6Al-4V. Были достигнуты толщины покрытия 220 и 170 мкм для HVAF и HVOF, соответственно. Покрытие HVAF показало более однородную и неизменную фазу WC по сравнению с покрытием HVOF, где хрупкая фаза W_2C образовалась из-за обезуглероживания WC. Это считалось одним из основных микроструктурных различий между методами HVAF и HVOF наряду с наличием значительного количества расплавленного материала, окружающего частично расплавленные частицы WC в покрытии HVOF, см. рис.2. Причина неизменной фазы WC в покрытии HVAF была связана с более низкой температурой и более высокой скоростью частиц, связанных с HVAF. Образование нежелательной фазы W_2C привело к снижению микротвердости поверхности для HVOF по сравнению с HVAF.

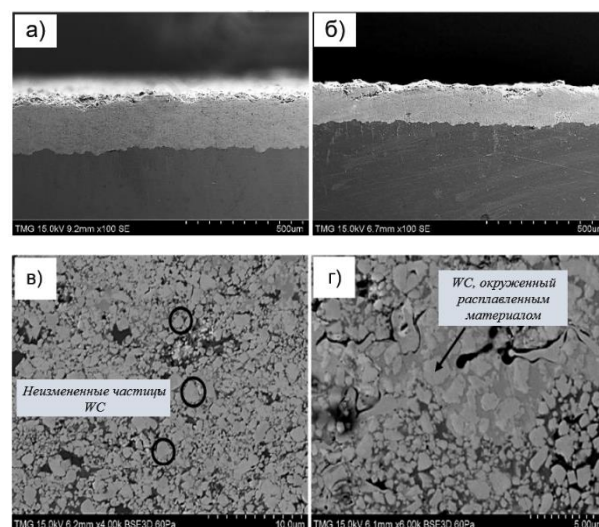


Рисунок 2. Микрофотографии поперечного сечения напыленных покрытий HVAF (а и в) и HVOF (б и г) [41]

Однако в аналогичных работах [42, 43] отмечается, что значения твердости покрытий, нанесенных методом HVOF, значительно выше, чем у аналога, нанесенного методом HVOF, что было связано с большим растворением карбида.

Микроструктуры и характеристики покрытий WC-Co-Cr зависят не только от типа систем термического напыления, но и от технологических параметров напыления, частиц порошка сырья (вид, морфология, состав) и вида используемого топлива [44]. Karla O.M и др. в своих работах исследовали влияние параметров напыления на микроструктуру и износостойкость покрытий WC-10Co-4Cr при сухом скольжении [44]. Учитывались два параметра: тип пламени (восстановительное, нейтральное и окислительное) и площадь выхода сопла напылительной горелки ($\phi = 1,5$ мм, $\phi = 2,4$ мм, $\phi = 4,8$ мм). Для всех испытанных условий давление ацетилена и кислорода поддерживалось постоянным на уровне 0,7 и 4 Бар соответственно. Как показали результаты анализа, что образец нанесенный с помощью восстановительного пламени, богатого топливом, сохранил самое высокое содержание WC ($\approx 24\%$) по сравнению с покрытиями, нанесенными с использованием нейтрального и окислительного кислородом пламени, которое показывало большую степень обезуглероживания (значительное присутствие элементарных пиков W и $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$), а соответствующая фаза карбида вольфрама (WC) снижалась до минимума (5% и 2% соответственно). Такое поведение было связано с химическим состоянием, богатым топливом, которое вызвано низкой температурой и высокой скоростью частиц. Напротив, высокие температуры и более длительное время пребывания частиц были достигнуты при нейтральном и окислительном пламени, что привело к более высокой степени разложения частиц карбида вольфрама. Площадь поперечного сечения сопла, являющаяся вторым параметром газопламенного напыления, также оказала существенное влияние на микроструктуру покрытия [44]. Сопла с небольшой выходной площадью были связаны с более высокими скоростями частиц и, следовательно, с более низкими температурами частиц и покрытиями с более однородной и плотной микроструктурой. А более высокая выходная площадь ограничивала степень деформации частиц, поскольку достигаются низкие скорости частиц.

V. P. Nguyen, T. N. Dang и др. в своей работе [45] изучали влияние толщины покрытия на усталостную прочность валов из стали AISI1045 с покрытием HVOF WC-10Co-4Cr и твердым хромированием. В результате чего, в образцах с закаленным хромым покрытием усталостная трещина возникает по поверхности покрытия, распространяется через покрытие, а затем развивается по толщине подложки, вызывая окончательное разрушение. По мере увеличения толщины покрытия хромированных образцов увеличивается плотность микротрещин и, следова-

тельно, снижается усталостная прочность. А усталостная прочность образца, покрытого методом HVOF, увеличивается с увеличением толщины покрытия, что может быть связано с величиной остаточного напряжения сжатия по границе раздела подложка-покрытие (см. рисунок 3). Аналогичные результаты обсуждались и в работах [46, 47].

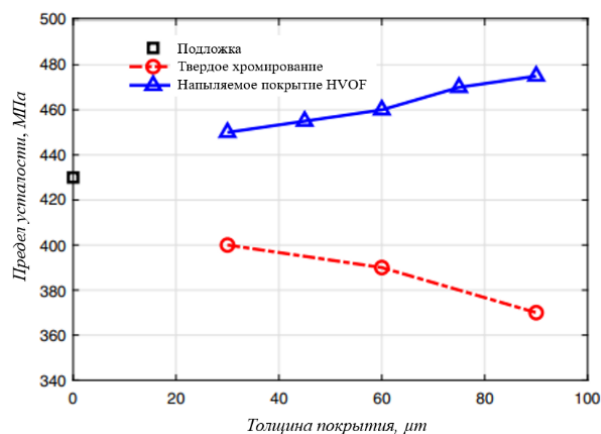


Рисунок 3. Усталостная прочность в зависимости от толщины покрытия [45]

2.2 Свойства износостойкости

В работе Wu, Y., Wang, B. и соавт. [48] были получены покрытия WC-10Co-4Cr методом напыления HVOF. Покрытие имело низкую пористость, высокую микротвердость и однородное распределение частиц карбида вольфрама (WC). Было обнаружено, что с увеличением нагрузки коэффициенты трения покрытия WC-10Co-4Cr и штампованной стали Cr12MoV (для холодной обработки) постепенно снижаются. Коэффициенты трения и потери массы покрытия при износе были сравнительно ниже, чем у стали Cr12MoV (см. рисунок 4). Для стали Cr12MoV основными механизмами износа были пластическая деформация и окисление, а у покрытия WC-10Co-4Cr при нагрузках 30 и 50 Н были экструзионная деформация и абразивный износ.

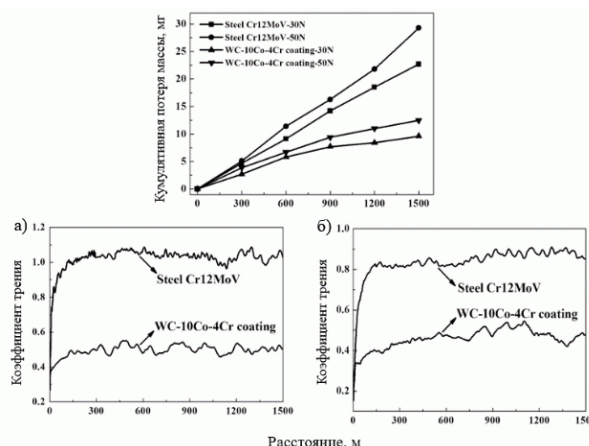


Рисунок 4. Кумулятивные потери массы и коэффициенты трения покрытия WC-10Co-4Cr и штамповой стали для холодной обработки: нагрузка 30 Н (а) и 50 Н (б) [48]

Во многих исследованиях [49, 50] отмечается, что в покрытиях WC-10Co-4Cr, полученных методом HVOF, происходит обезуглероживание (уменьшение содержания углерода) и разложение карбида вольфрама (WC) на карбида дивольфрама (W_2C) во время напыления, что непосредственно влияет на износостойкость покрытия. Однако, в работе [51] говорится, что процент обезуглероживания до 60% не влияет на износостойкость покрытий. Соответственно, покрытия с высокой твердостью и износостойкостью могут быть получены с помощью всех систем напыления HVOF при правильном выборе напыляемого порошка и технологических параметров. Напомним, что в этой работе авторы проводили исследования с различными системами напыления HVOF, с использованием семи различных порошков WC-Co и WC-Co-Cr.

В целом, поведение износостойкости при скольжении контролировалось распределением твердых частиц в микроструктуре и наличием твердых карбидов вольфрама (WC) и карбидов дивольфрама (W_2C) фаз, и такие факторы, как обезуглероживание фазы (W_2C и Co_6W_6C), слабые межфазные связи, влияющие на износостойкость покрытия не были решены путем оптимизации процесса напыления HVOF, поскольку это была отработанная технология.

Поэтому в работе [52] все большее внимание уделяется улучшению структуры исходного порошкового материала, путем смешивания его с порошком коричневого оксида алюминия (150–250 мкм) в массовом соотношении 1:5, для повышения износостойкости покрытия. То есть, новый процесс обработки с использованием оксида алюминия для изготовления полностью уплотненных, ультрадисперсных микроструктурных и идеально сферических частиц WC-Co применяется непосредственно к методу HVOF. На основе этого нового процесса, в этой работе полностью устранено явление обезуглероживания, влияющие на износостойкость покрытия (см. рисунок 5).

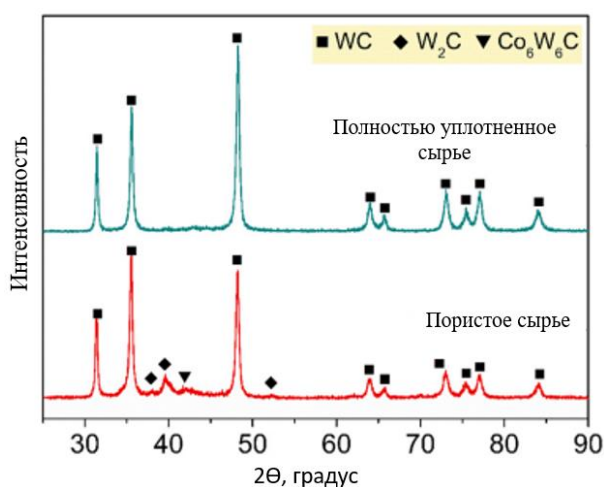


Рисунок 5. Фазовый состав покрытий, полученных методом напыления HVOF пористого и полностью уплотненного порошка исходного сырья [52]

Была получена уникальная связующая структура с нанокристаллическими и аморфными соединениями. Благодаря такой структуре износостойкость нового покрытия WC-Co, напыленного методом HVOF при температуре 1350 °C была в 4 раза выше, чем у несмешанного покрытия. Отмечается, что предложенный способ может быть применен и к другим различным керамическим покрытиям, такие как WC-Co-Cr и Cr_3C_2 -NiCr, для улучшения износостойких свойств покрытия.

Таким образом, необходимо правильно выбрать порошковый материал и тщательно оптимизировать параметры напыления, чтобы обеспечить достаточную скорость частиц с целью получения долговечных покрытий, одновременно предотвращая перегрев частиц для предотвращения обезуглероживания.

2.3 Эрозионные и коррозионные свойства покрытий

В немногих опубликованных работах основное внимание уделялось влиянию параметров напыления, играющих важную роль в определении микроструктуры и, в свою очередь, коррозионной и эрозионной стойкости металлокерамических покрытий WC-10Co-4Cr, напыленных методом HVOF.

Li, S., Guo, Z. и др. [53] рассматривают коррозионные свойства покрытий WC-17Co, WC-10Co-4Cr, Cr_3C_2 -25NiCr, полученных методом HVOF в щелочно-сульфидном растворе. Проводится восемнадцатидневное испытание погружением и анализ скорости коррозии показывает, что покрытие Cr_3C_2 -25NiCr с низкой пористостью обладает наилучшей коррозионной стойкостью. Однако в других растворах коррозионные свойства покрытий на основе карбида вольфрама выражены с лучшей стороны.

Например, в работе [54] металлокерамические покрытия WC/Co-Cr и WC/ Cr_3C_2 /Ni толщиной от 300 до 450 мкм были получены методом HVOF для сравнения морфологических и механических свойств, а также поведения при электрохимической коррозии. Образец, содержащий Co и Cr в металлической матрице, имел коррозионный потенциал по сравнению с образцом, содержащим только Ni в металлической матрице металлокерамического покрытия. Однако оба покрытия показали аналогичную кинетику коррозии, основанную на определенных значениях плотности тока коррозии (см. рисунок 6). Также покрытие WC/Co-Cr было более твердым, имело более низкий коэффициент трения и более низкий уровень пористости по сравнению с покрытием WC/ Cr_3C_2 /Ni.

C. R. C. Lima и др. [55] в качестве исходного сырья в способе HVOF использовали три порошковых материала Cr_3C_2 -25NiCr, WC-17Co и WC-12Co. Покрытие WC-17Co показало лучшие результаты при испытании на эрозию, что было связано с уникальным сочетанием параметров высокой микротвердости и низкой пористости (см. рисунок 7). Коррозионное поведение покрытия Cr_3C_2 -25Ni-Cr было наименее благоприятным из всех испытанных образцов,

что возможно были обусловлены с высокой шероховатостью и высокой пористостью, а также разрушением пассивированного слоя.

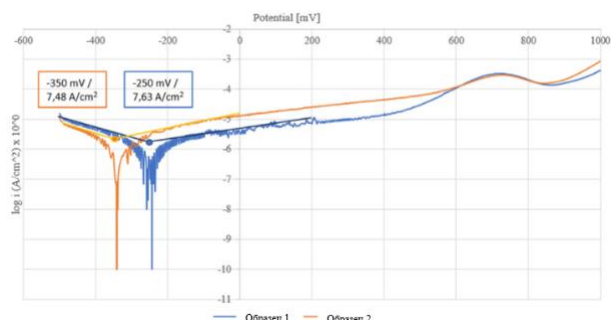


Рисунок 6. Полулогарифмические поляризационные кривые WC/Co-Cr (1) и WC/Cr₃C₂/Ni (2) [54]

Эрозионные свойства термически напыляемых покрытий из карбида вольфрама (WC) исследовались многими учеными [56, 57]. В работе [56] авторы исследовали коммерческое покрытие WC-10Co-4Cr, нанесенное с помощью HVOF на подложку AISI 4140. Они показали, что устойчивость образцов покрытия к эрозионному износу была значительно улучшена. Износостойкость сравнивалась с износостойкостью материала без покрытия. При малом угле удара основным механизмом эрозионного износа были микрорезания, а также разрушение горизонтальных трещин. В аналогичном исследовании [57] был проведен анализ характеристик эрозионного износа образцов подложек SS304, покрытых WC-10Co-4Cr и Ni-20Cr₂O₃. Было замечено, что образцы, покрытые WC-10Co-4Cr, дают лучшие характеристики, чем Ni-20Cr₂O₃.

В целом покрытия, выбираемые для затворов и сидел, должны отвечать строгим эксплуатационным требованиям и обеспечивать надежное газонепроницаемое уплотнение металл-металл. Как показал ана-

лиз литературы, процесс нанесения покрытий с использованием высокоскоростного кислородно-топливного напыления (HVOF) улучшает свойства поверхности, повышая износостойкость и коррозионную стойкость, а также обеспечивают эффективное уплотнение между функциональными поверхностями. Однако, по литературным данным можно сказать, что недостаточно изучены закономерности формирования структурно-фазовых состояний HVOF-покрытий на основе WC-10Co-4Cr.

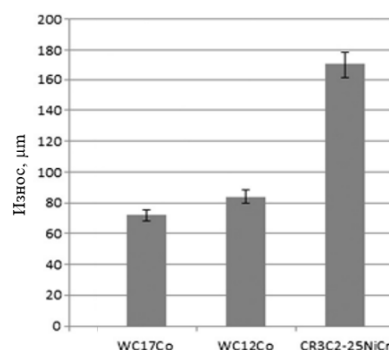


Рисунок 7. Сравнительные результаты линейного износа покрытий при эрозионно-коррозионных испытаниях [55]

Поэтому вопрос проведения комплексных экспериментальных исследований структурно-фазового состояния покрытий на основе карбида вольфрама в зависимости от технологического режима напыления остается актуальным. Также более детальное понимание кинетики формирования структуры и изменение механических, трибологических, эрозионных и коррозионных характеристик покрытий на основе карбида вольфрама в зависимости от технологического режима напыления и от характеристик порошка имеет важное значение для разработки технологического процесса поверхностной обработки компонентов шибберных задвижек.

Таблица. Корреляционная таблица данных по вышеизложенной проблеме получения карбидных покрытий с применением различных технологий напыления

Порошки для нанесения покрытий, материалы подложки	Методы нанесения покрытий	Параметры напыления, варьированные параметры	Полученные данные	Замечания	Ссылки
1. Порошок WC-10Co-4Cr (WOKA 3652, Oerlikon Metco Co. Ltd., Швейцария), размер частиц от 15 до 45 мкм. 2. Сталь AISI 1045	1. Jet Kote HVOF (Stellite Coatings, Inc., США) 2. Твердое хромирование	1. Сжиженный нефтяной газ (пропан+бутан), кислород, воздух, расстояния напыления - 210 мм для HVOF 2. Хромовая кислота (250 г/л), серная кислота (2,5 г/л) 3. Варьирована толщина покрытий.	Усталостная прочность образцов с покрытием HVOF имеет тенденцию увеличиваться с увеличением толщины покрытия. Напротив, усталостная прочность твердых хромированных образцов уменьшается с увеличением толщины покрытия	Увеличение усталостной прочности было связано с остаточным напряжением	[45]
1. Порошок WC-10Co-4Cr (Кастолина, Канада), размер частиц от 15 до 45 мкм. 2. Сплав Ti-6Al-4V.	1. Intelli-Jet AC HVOF. 2. DJ2701 HVOF.	1. Пропилен, азот, расстояние напыления - 76,5 и 50,8 мм. 2. Топливо, кислород, воздух, расстояния напыления - 200–250 мм. 4. Варьированы методы газотермического напыления.	Покрытие WC-10Co-4Cr, нанесенное методом HVOF, показало наименьшую степень обезуглероживания, более однородную и неизменную фазу WC, достигнув наилучших свойств с точки зрения твердости, и медленнее подвергалось эрозии по сравнению с покрытием HVOF, где хрупкая фаза W ₂ C образовалась из-за обезуглероживания WC.	Обуглероживание покрытий уменьшается при использовании пламени с более низкой температурой и более высокой скоростью частиц. Увеличение скорости удара при-	[41]

**ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ HVOF ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ
НА ОСНОВЕ WC – ОБЗОР**

Порошки для нанесения покрытий, материалы подложки	Методы нанесения покрытий	Параметры напыления, варьированные параметры	Полученные данные	Замечания	Ссылки
				водит к более быстрому началу эрозии.	
1. Агломерированный и спеченный порошок WC-10Co-4Cr с размером частиц 45±11 мкм. 2. Низкоуглеродистая сталь ASTM A36.	CastoDyn DS 8000 (Castolin Eutectic) HVOF.	1. Кислород и ацетилен, расстояние напыления – 200 мм. 2. Варьированы поток ацетиленового газа и площадь поперечного сечения сопла.	Во время перехода от пламени, богатого топливом, к пламени, богатому кислородом, в покрытиях было меньше накопленных частиц WC и больше обезуглероживания и реакции со связующей фазой. А пламя, богатое топливом, снижало тепловыделение во время напыления и, следовательно, степень разложения WC на W ₂ C, W и Co ₃ W ₂ C. Сопла с небольшой выходной площадью были связаны с более высокими скоростями и низкими температурами частиц, а более высокая выходная площадь ограничивала степень деформации частиц, поскольку обеспечиваются низкие скорости частиц.	Уменьшение нагревательной способности пламени и/или увеличение его скорости обеспечивало более низкие уровни обезуглероживания	[44]
1. Агломерированный и спеченный порошок WC-10Co-4Cr с размером частиц 45±15 мкм (Large Solar Thermal Spraying Material Co. Ltd., Чэнду, Китай). 2. Сталь AISI 1045.	1. Praxair Tafa-JP8000 HVOF (США). 2. Холодная штамповка.	1. Керосин, кислород, расстояние напыления – 300 мм. 2. Варьирована исследуемая среда в зависимости от метода.	Коэффициенты трения и потери массы при износе покрытия WC-10Co-4Cr были явно ниже, чем у стали Cr12MoV.	С увеличением нагрузки коэффициенты трения исследуемых материалов уменьшались	[48]
1. Агломерированные и спеченные порошки WC-Co 83-17, WC-Co 88-12, расплавленный порошок WC-Co 88-12 с размером частиц 45±10 мкм; спеченный порошок WC-Co 88-12 с размером частиц 45±5,6 мкм; спеченный измельченный порошок WC-Co-Cr 86-10-4 с размером частиц 45±11 мкм; спеченные порошки WC-Co-Cr 86-10-4, WC-Co-Cr 86-6-8 с размером частиц 45±15 мкм. 2. Мягкая сталь.	1. HVOF systems Jet Kote (Stellite Coatings, Goshen, IN). 2. HVOF Top Gun (UTP Schweißmaterial Bad Krozingen, Germany). 3. HVOF Diamond Jet (DJ) Standard. 4. HVOF DJ 2600. 5. HVOF DJ 2700 (Sulzer Metco, Westbury, NY). 6. HVOF JP-5000 (Tafa, Concord, NH). 7. HVOF Top Gun-K (GTV, Luckenbach, Germany).	1. Водород, этилен, пропан, кислород. 2. Водород, этилен, пропан, кислород. 3. Пропан, кислород. 4. Водород, кислород. 5. Пропан, этилен, кислород. 6. Керосин, кислород. 7. Керосин, кислород. 8. Варьированы различные виды топлива и различные системы напыления HVOF.	Было определено, что обезуглероживание не влияет на свойства покрытий, такие как твердость и износостойкость, когда потери углерода остаются ниже 60%. По твердости, износостойкости и микроструктуре покрытия WC-Co-Cr были сопоставимы с покрытиями WC-Co, однако коррозионная стойкость WCCo-Cr был значительно выше.	Высокие износостойкие покрытия могут быть получены всеми системами напыления HVOF при правильном выборе технологических параметров	[51]
1. Ультрадисперсный композитный порошок WC-12C (250 нм). 2. Стальная подложка.	HVOF, JP5000.	1. Кислород, керосин, азот, расстояние напыления – 360 мм. 2. Варьирован размер частиц исходного сырья	Получение уплотненных, сферических частиц WC-Co без каких-либо фазовых изменений с использованием оксида алюминия значительно повысило износостойкость покрытия.	Предлагаемый подход также применим к различным типам металлокерамических покрытий.	[52]
1. Агломерированные и спеченные порошки WC-17Co, WC-10Co-4Cr, Cr ₃ C ₂ -25NiCr с размером частиц 45±15 мкм. 2. Сталь AISI 1045.	JP5000 HVOF (Praxair, США).	1. Керосин, кислород, сжатый воздух, расстояние напыления – 350 мм. 2. Варьированы исследуемые порошки.	Покрытие Cr ₃ C ₂ -25NiCr показало наилучшую коррозионную стойкость среди трех покрытий.	Коррозия происходила в основном в связующей фазе из-за различных потенциалов между твердой фазой и связующей фазой.	[53]
1. Были использованы два металлокерамических порошка от компании Oerlikon Deutschland Holding GmbH (WC/Co-Cr 86/10-4 и WC/Cr ₃ C ₂ /Ni 73/20/7). Обе партии имели размер частиц 45±15 мкм.	HVOF (K2, GTV GmbH).	Керосин, кислород, газ-носитель азот, расстояние напыления для WC-Co-Cr – 295 мм, для WC-Cr ₃ C ₂ -Ni – 280 мм. 2. Варьированы исследуемые порошки и скорости подачи порошка.	Было обнаружено, что скорость подачи порошка сильно влияет на характеристики металлокерамических покрытий, то есть на микроструктуру покрытий и, косвенно, на характер износа при скольжении, соответственно, на электрохимическую коррозионную стойкость.	Уменьшение массового расхода порошка значительно улучшило качество покрытия (например, пористость, морфологию, твердость). Резкое снижение массового	[54]

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ HVOF ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ WC – ОБЗОР

Порошки для нанесения покрытий, материалы подложки	Методы нанесения покрытий	Параметры напыления, варьированные параметры	Полученные данные	Замечания	Ссылки
2. Нержавеющий сталь X6CrNiMoTi17-12-2 (EN 1.4571).			Напыляемое покрытие WC/Co-Cr обладало лучшей коррозионной стойкостью, чем WC/Cr ₃ C ₂ /Ni в 3,5 мас.% растворе NaCl.	расхода привело к значительному увеличению степени пористости.	
1. Cr ₃ C ₂ -25NiCr, WC-17Co, WC-12Co с размером частиц 45±15 мкм. 2. Сталь AISI 1020.	HVOF (JP-5000).	1. Керосин, кислород, воздух, расстояния напыления: 1. 250 мм; 2. 350 мм; 3. 350 мм. Варьированы исследуемые порошки.	Эрозионная стойкость обоих покрытий (WC-17Co и WC-12Co) показывает хорошие результаты, близкие друг к другу, характеристики покрытия Cr ₃ C ₂ -25NiCr были наилучшими из всех исследованных образцов.	Стойкость к эрозионно-коррозионному износу отдает предпочтение металллокерамике из-за их гораздо более высокой твердости.	[55]

3. ВЫВОДЫ

Согласно, обзору и подробному анализу имеющейся литературы на тему «Применение технологии HVOF для получения износостойких покрытий на основе WC» установлено, что:

- наиболее подходящими материалами для увеличения ресурса деталей запорной арматуры являлись материалы на основе карбидов, обладающие высокими эксплуатационными характеристиками, в частности WC-Co-Cr;
- металллокерамические покрытия, полученные методом HVOF, по своим трибологическим свойствам имели преимущество перед гальваническим хромированием;
- покрытия, полученные методом HVOF, превосходили покрытия, полученные методом HVOF. Более низкие характеристики HVOF объяснялись образованием нежелательной хрупкой фазы W₂C;
- наличие твердой, но хрупкой фазы W₂C в составе покрытий WC-Co-Cr, WC-Co, полученных методом HVOF, повышало твердость;
- микроструктура покрытий на основе WC, полученных методами HVOF/HVAF, имела однородную, плотную структуру;
- образец, содержащий Co и Cr в металлической матрице, имел коррозионный потенциал по сравнению с образцом, содержащим только Ni в металлической матрице металллокерамического покрытия;
- характеристики покрытий на основе WC зависели не только от системы термического напыления, но и от параметров напыления, типа частиц исходного порошка, вида используемого топлива;
- обезуглероживание покрытий на основе карбида вольфрама уменьшилось в низкотемпературном пламени;
- пламя, обогащенное не кислородом, а топливом, уменьшало степень разложения WC на W₂C, Co₃W₃C при напылении;
- для устранения явления обезуглероживания, т.е. хрупких фаз W₂C, был проведен процесс полного уплотнения исходного порошка WC-Co для повышения износостойкости покрытия WC-Co напыленного методом HVOF.

В целом, на наш взгляд, износостойкие покрытия на основе WC, полученные методом HVOF, могут

увеличить фактический срок службы арматуры и длительность межремонтного периода, но все же требуют тщательных исследований, кроме того, скрытые резервы сравнительно новой технологии высокоскоростного кислородно-топливного напыления (HVOF) все еще не раскрыты.

Поэтому, авторы данной статьи считают, что путем доработки системы HVOF, подбора оптимальных режимов и состава порошков можно улучшить трибологические и коррозионные характеристики покрытий WC-Co-Cr и применить их для повышения срока службы шибберных задвижек. Для осуществления этих работ будет использоваться установка для высокоскоростного кислородно-топливного напыления HVOF Termika-3 (ООО «Плазмацентр», г. Санкт-Петербург), расположенная в научно-производственной компании ТОО «PlasmaScience» (г. Усть-Каменогорск, Казахстан).

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Шеров К.Т., Габдысальк Р. Анализ и исследование проблемы изготовления крупных задвижек для магистральных трубопроводов // Труды университета. Караганда: Изд-во КарГТУ. – 2018. № 1 (70) – С. 13–17. [Sherov K.T., Gabdysalyk R. Analiz i issledovanie problemy izgotovleniya krupnykh zadvizhek dlya magistral'nykh truboprovodov // Trudy universiteta. Karaganda: Izd-vo KarGTU. – 2018. No. 1 (70) – P. 13–17.]
2. <https://www.youtube.com/watch?v=wg5IZN2noH0>
3. <https://www.uzpa.kz/about/>
4. Полосков С. С. Проблемы наплавки уплотнительных поверхностей трубопроводной арматуры и пути их решения // Вестник Донского государственного технического университета. – 2019. Т. 19. № 4. – С. 349–356. [Poloskov S. S. Problemy naplavki uplotnitel'nykh poverkhnostey truboprovodnoy armatury i puti ikh resheniya // Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2019. T. 19. No. 4. – P. 349–356.]
5. Туков С.А., Корчагина М.В., Киреев С.О. Проблемы герметичности шаровых кранов и методы их решения // Донской государственный технический университет. – 2018, С. 12–15. [Tukov S.A., Korchagina M.V., Kireev S.O. Problemy germetichnosti sharovykh kranov i metody ikh resheniya // Donskoy gosudarstvennyy tekhnicheskiiy universitet. – 2018, P. 12–15.]
6. <http://www.indmet.ru/tech/vyisokoskorostnoe-gazotermicheskoe-napylenie-hvof>

7. Keshavamurthy R., Sudhan M.D., Kumar A., Ranjan V., Singh P., Singh A. Wear behaviour of hard chrome and tungsten carbide-HVOF coatings // *Materialstoday: proceedings*. – 2018. V. 5. P. 24587–24594. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.10.256>
8. Kumar H., Chittosiya Ch., Shukla V.N. HVOF Sprayed WC Based Cermet Coating for Mitigation of Cavitation, Erosion & Abrasion in Hydro Turbine Blade // *Materials Today: Proceedings*. – 2018. V. 5. P. 6413–6420. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.12.253>
9. Li G.P., Peng Y.B., Yan L.W., Xu T., Long J.Z., Luo F.H. Effects of Cr concentration on the microstructure and properties of WC-Ni cemented carbides // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2020. V.9. – P. 902-907. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.11.030>
10. Дружнова Я.С. Развитие методов газотермического напыления упрочняющих покрытий на основе карбидов вольфрама и хрома (обзор) // *Труды ВИАМ*. – 2022. № 10 (116). [Druzhnova Ya.S. Razvitie metodov gazotermicheskogo napyleniya uprochnyayushchikh pokrytiy na osnove karbidov vol'frama i khroma (obzor) // *Trudy VIAM*. – 2022. No. 10 (116).]
11. Jianxing Yu, Xin Liu, Yang Yu, Haoda Li, Pengfei Liu, Kaihang Huang and Ruoke Sun. Research and Application of High-Velocity Oxygen Fuel Coatings // *Coatings*. – 2022. V. 12(6). P. 828. <https://doi.org/10.3390/coatings12060828>
12. Samodurova, M., Shaburova, N., Samoilova, O., Moghadam A.O., Pashkeev K., Ul'yanitskiy V., Trofimov E. Properties of WC–10%Co–4%Cr Detonation Spray Coating Deposited on the Al–4%Cu–1%Mg Alloy // *Materials*. – 2021. V. 14(5). <https://doi.org/10.3390/ma14051206>
13. Ghadami F., Sabour Rouh Aghdam A. Improvement of high velocity oxy-fuel spray coatings by thermal post-treatments: A critical review // *Thin Solid Films*. – 2019. V.678. P. 42–52. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2019.02.019>
14. Maharajan S., Michael Thomas Rex F., Ravindran D., Rajakarunakaran S. Erosive and corrosive wear performance and characterization studies of plasma-sprayed WC/Cr₃C₂ coating on SS316 // *Applied Ceramic Technology*. – 2022. <https://doi.org/10.1111/ijac.14118>
15. Bhosale D.G., Ram Prabhu T., Rathod W.S. Sliding and erosion wear behaviour of thermal sprayed WC–Cr₃C₂–Ni coatings // *Surface and Coatings Technology*. – 2020. V. 400. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126192>
16. Vats A, Patnaik A., Meena M.L, Shringi D. Role of microfactors on microstructure and on the tribological performance of HVOF coatings: A review // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2021. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1017/1/012010>
17. Robert J.K. Wood, S. Herd, Mandar R. Thakare. A critical review of the tribocorrosion of cemented and thermal sprayed tungsten carbide // *Tribology International*. – 2018. P. 491–509. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.10.006>
18. Zhou W.X., Zhou K.S., Li Y.X., Deng C.M., Zeng K.L. High temperature wear performance of HVOF-sprayed Cr₃C₂–WC–NiCoCrMo and Cr₃C₂–NiCr hardmetal coatings // *Applied Surface Science*. – 2017. V. 416, P. 33–44. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.04.132>
19. Gopi R., Saravanan I., Devaraju A., Ponnusamy P. Tribological behaviour of thermal sprayed high velocity oxy-fuel coatings on tungsten carbide – A review // *MaterialsToday: Proceeding*. – 2020. V. 39. P. 292–295. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.133>
20. Picas J.A. [et al.]. Microstructure and wear resistance of WC–Co by three consolidation processing techniques // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2009. V. 27, P. 344–349. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2008.07.002>
21. <http://www.indmet.ru/tech/vyisokoskorostnoe-gazotermicheskoe-napylenie-hvof>
22. <https://www.plasmacentre.ru/oborudovanie/oborudovanie-dlya-napyleniya/ustanovka-hvof-termika/>
23. <https://www.plasmascience.kz/оборудование/>
24. <http://www.coating-ball.com/ru/index.php?page=high-velocity-spray>
25. <https://www.flamespraytech.ru/processes/HVOF>
26. Батиенков Р.В., Бурковская Н.П., Большакова А.Н., Худнев А.А. Высокотемпературные композиционные материалы с металлической матрицей (обзор) // *Труды ВИАМ*. – 2020. № 6–7 (89). [Batiykov R.V., Burkovskaya N.P., Bol'shakova A.N., Khudnev A.A. Vysokotemperaturnye kompozitsionnye materialy s metallicheskoj matritsey (obzor) // *Trudy VIAM*. – 2020. No. 6–7 (89).]
27. Mishra T.K., Kumar A., Sinha S.K. Experimental investigation and study of HVOF sprayed WC–12Co, WC–10Co–4Cr and Cr₃C₂–25NiCr coating on its sliding wear behavior // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2021, V. 94. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2020.105404>
28. Magdy M. El Rayes, El-Sayed M. Sherif, Hany S. Abdo. Comparative study into microstructural and mechanical characterization of HVOF-WC-based coatings // *Crystals*. – 2022. 12(7), 969. <https://doi.org/10.3390/cryst12070969>
29. Testa V., Morelli S., Bolelli G., Benedetti B., Puddu P., Sassatelli P., Lusvarghi L. Alternative metallic matrices for WC-based HVOF coatings // *Surface and Coatings Technology*. – 2020. V. 402. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126308>
30. Xiao-bin Liu, Jia-jie Kang, Wen Yue, Zhi-qiang Fu, Li-na Zhu, Ding-shun She, Jian Liang, Cheng-biao Wang. Performance evaluation of HVOF sprayed WC–10Co₄Cr coatings under slurry erosion // *Surface Engineering*. – 2019. <https://doi.org/10.1080/02670844.2019.1568661>
31. Govande A.R., Chandak A., Sunil B.R., Dumpala R. Carbide-based thermal spray coatings: a review on performance characteristics and post-treatment // *International Journal Refractory Metals and Hard Materials*. – 2022. V. 103. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2021.105772>
32. Панин А.В. [и др.] Методы нанесения защитных покрытий: учебное пособие / А.В. Панин, А.Р. Шугуров, А.Г. Колмаков // Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во ООО «СПБ Графикс», – 2020. – 109 с. [Panin A.V. [i dr.] Metody naneseniya zashchitnykh pokrytiy: uchebnoe posobie / A.V. Panin, A.R. Shugurov, A.G. Kolmakov // *Tomskiy politekhnicheskii universitet*. – Tomsk: Izd-vo ООО “SPB Grafiks”, – 2020. – 109 p.]
33. Donadei V, Koivoluoto H, Sarlin E, Vuoristo P. Lubricated icephobic coatings prepared by flame spraying with hybrid feedstock injection // *Surface and Coatings Technology*. – 2020. V. 403. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126396>
34. Devaraj S., McDonald A., Chandra S. Metallization of porous polyethylene using a wire-arc spray process for heat transfer applications // *Journal of Thermal Spray*

- Technology. – 2021. V. 30. P. 145–156.
<https://doi.org/10.1007/s11666-020-01119-1>
35. Jhonattan de la Roche, Juan Manuel Alvarado-Orozco, Pablo Andres Gomez, Irene Garcia Cano, Sergi Dosta, Alejandro Toro. Hot corrosion behavior of dense CYSZ/YSZ bilayer coatings deposited by atmospheric plasma spray in Na₂SO₄ + V₂O₅ molten salts // Surface and Coatings Technology. – 2022. V. 432.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.128066>
36. Huang C., Arsenko M., Zhao L., Xie Y., Elsenberg A., Li W., Gartner F., Simar A., Klassen T. Property prediction and crack growth behavior in cold sprayed Cu deposits // Materials & Design. – 2021. V. 206.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109826>
37. Singh V., Singh I., Bansal A., Omer A., Singla A.K., Rampal A., Goyal D.K. Cavitation erosion behavior of high velocity oxy fuel (HVOF) sprayed (VC + CuNi-Cr) based novel coatings on SS316 steel // Surface and Coatings Technology. – 2022. V. 432.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.128052>
38. Praveen AS, Arjunan A. High-temperature oxidation and erosion of HVOF sprayed NiCrSiB/Al₂O₃ and NiCrSiB/WC-Co coatings // Applied Surface Science Advances. – 2022. V. 7.
<https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2021.100191>
39. Pishva, P.; Salehi, M.; Golozar, M.A. Effect of grinding on surface characteristics of HVOF-sprayed WC–10Co–4Cr coatings // Surface Engineering. – 2020, V. 36, P. 1180–1189.
<https://doi.org/10.1080/02670844.2019.1647938>
40. Jonda E., Łatka L. Comparative analysis of mechanical properties of WC-based cermet coatings sprayed by HVOF onto AZ31 magnesium alloy substrates // Advances in Science and Technology Research Journal. – 2021. V. 15. <https://doi.org/10.12913/22998624/135979>
41. Abdullahi K. Gujba, Mohammed S. Mahdipoor, Mamoun Medraj. Water droplet impingement erosion performance of WC-based coating sprayed by HVAF and HVOF // Wear an International Journal on the Science and Technology of Friction, Lubrication and Wear. – 2021. V. 484–485. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203904>
42. Bolelli G., Berger L.M., Börner T., Koivuluoto H., Lusvardi L., Lyphout C., Markocsan N., Matikainen V., Nylén P., Sassatelli P., Trache R., Vuoristo P. Tribology of HVOF- and HVAF-sprayed WC–10Co4Cr hardmetal coatings: A comparative assessment // Surface & Coatings Technology. – 2015. V. 265.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.01.048>
43. Marzanna Ksiazek, Ilona Nejman and Lukasz Boron. Investigation on Microstructure, Mechanical and Wear Properties of HVOF Sprayed Composite Coatings (WC–Co + CR) On Ductile Cast Iron // Materials. – 2021. V. 14(12). <https://doi.org/10.3390/ma14123282>
44. Karla O.M. and [et al.]. Microstructure and Properties Characterization of WC-Co-Cr Thermal Spray Coatings // Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering. – 2018. V. 6. P. 482–497.
<https://doi.org/10.4236/jmmce.2018.64034>
45. Nguyen V. P., Dang T. N., Le C. C., & Wang D. A. Effect of coating thickness on fatigue behavior of AISI 1045 steel with HVOF thermal spray and hard chrome electroplating // Journal of Thermal Spray Technology. – 2020. V. 29(8). P. 1968–1981. <https://doi.org/10.1007/s11666-020-01090-x>
46. Vinh P. N., Thien N. D., & Le Chi C. Evaluating the effect of HVOF sprayed WC-10Co-4Cr and hard chromium electroplated coatings on fatigue strength of axle-shaped machine parts // In International Conference on Engineering Research and Applications. – 2018. P. 309–317.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-04792-4_41
47. Castro R. D. M., Rocha A. D. S., Mercado Curi E. I., & Peruch F. A comparison of microstructural, mechanical and tribological properties of WC-10Co4Cr-HVOF coating and hard chrome to use in hydraulic cylinders // American Journal of Materials Science. Rosemead. – 2018. Vol. 8. No. 1. P. 15–26.
<https://doi.org/10.5923/j.materials.20180801.03>
48. Wu Y., Wang B., Hong S., Zhang J., Qin Y., & Li G. Dry sliding wear properties of HVOF sprayed WC–10Co–4Cr coating // Transactions of the Indian Institute of Metals. – 2015. V. 68(4). P. 581–586.
<https://doi.org/10.1007/s12666-014-0487-3>
49. Wang D., Zhang B., Jia C., Gao F., Yu Y., Chu K., Zhang M., Zhao X. Influence of carbide grain size and crystal characteristics on the microstructure and mechanical properties of HVOF-sprayed WC-CoCr coatings // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2017. V. 69. P. 138–152
<https://doi.org/10.1016/j.jrmhm.2017.08.008>
50. Xiang D., Cheng X.D., Xiang Y.U., Chao L.I., Ding Z.X. Structure and cavitation erosion behavior of HVOF sprayed multi-dimensional WC–10Co4Cr coating // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. – 2018. V. 28. P. 487–494. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(18\)64681-3](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(18)64681-3)
51. Schwetzke R., Kreye H., Therm J. Microstructure and properties of tungsten carbide coatings sprayed with various high velocity oxygen fuel spray systems // Journal of Spray Technology. – 1999. V. 8(3). P. 433–438.
<https://doi.org/10.1361/105996399770350395>
52. Haibin W., Qingfan Q. Wear resistance enhancement of HVOF-sprayed WC-Co coating by complete densification of starting powder // Materials and Design. – 2020. V. 191. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108586>
53. Li S., Guo Z., Xiong J., Lei Y., Li Y., Tang J. & Ye J. Corrosion behavior of HVOF sprayed hard face coatings in alkaline-sulfide solution // Applied Surface Science. – 2017. V. 416. P. 69–77.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.04.149>
54. Julian EBlér, Dino Woelk, Dragos Utu, Gabriela Marginean. Influence of the powder feed rate on the properties of HVOF sprayed WC-based cermet coatings // Materials Today: Proceedings. – 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.11.120>
55. Lima C. R. C. [et al.]. Developing alternative coatings for repair and restoration of pumps for caustic liquor transportation in the aluminum and nickel industry // Surface and Coatings Technology. – 2015. V. 268. P. 123–133.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.08.010>
56. Zheng C. [et al.]. Experimental study on the erosion behavior of WC-based high-velocity oxygen-fuel spray coating // Powder Technology. – 2017. V. 318. P. 383–389.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.06.022>
57. Singh J., Kumar S. and Mohapatra S. K. Tribological analysis of WC–10Co–4Cr and Ni–20Cr₂O₃ coating on stainless steel 304 // Wear. – 2017. V. 376–377. P. 1105–1111. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.01.032>

WC НЕГІЗІНДЕГІ ТОЗУҒА ТӨЗІМДІ ЖАБЫНДАРДЫ АЛУ ҮШІН
HVOF ТЕХНОЛОГИЯСЫН ҚОЛДАНУ-ШОЛУ

Б.К. Рахадиллов¹⁾, Н. Мұқтанова²⁾, Л.Г. Журерова¹⁾

¹⁾ С. Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті, Өскемен қаласы, Қазақстан

²⁾ Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қаласы, Қазақстан

Мақалада мұнай және газ өнеркәсібінің магистральдық құбыр көлігі үшін шиберлі ысырмалардың тозуы мен қызмет ету мерзімінің негізгі мәселелері келтірілген. Бұл мәселелерді шешудің бір жолы-тозуға төзімді және коррозияға төзімді жабындардың жұқа қабатын қолдану. Материалдардың үнемі өсіп келе жатқан құнына, сондай-ақ материалдарға қойылатын талаптардың артуына байланысты соңғы уақытта жабындарды қолдану әдістеріне көбірек мән берілуде. Газдықтермиялық жабын әдістерінің ішінде жоғары жылдамдықты оттегі-отынымен тозаңдау (HVOF) технологиясы қаттылығы мен адгезиясы жоғарылаған, сондай-ақ эрозия, коррозия және тозуға төзімділік қасиеттері жақсартылған, кеуектілігі 1%-дан аз жоғары тығыздықты жабындарды алуға мүмкіндік беретін жаңа және жылдам дамып келе жатқан технология болып табылады. Бұл шолу мақаласында әртүрлі бүрку технологиялары арқылы алынған карбидті жабындардың сипаттамаларына салыстырмалы шолу жасалды.

Түйін сөздер: WC-Co-Cr жабыны, HVOF технологиясы, тозуға төзімділік, адгезия, коррозияға төзімділік, термиялық тозаңдау.

APPLICATION OF HVOF TECHNOLOGY FOR WC-BASED
WEAR-RESISTANT COATINGS – AN OVERVIEW

B.K. Rakhadilov¹⁾, N. Muktanova²⁾, L.G. Zhurerova¹⁾

¹⁾ S. Amanzholov East Kazakhstan University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

²⁾ D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

The article presents the main problems of wear and service life of slide gate valves for trunk pipeline transport of oil and gas industry. One of the possible ways to solve these problems is the application of a thin layer of wear-resistant and corrosion-resistant coatings. Due to the ever-increasing cost of materials, as well as the increased requirements for materials, coating methods have recently become increasingly important. Among the gas-thermal coating methods, the High Velocity Oxygen-Fuel Spray (HVOF) technology is a new and rapidly developing technology that produces high density coatings with porosity less than 1%, with improved hardness and adhesion as well as improved erosion, corrosion and wear resistance properties. This overview article provides a comparative review of the characteristics of carbide coatings produced using different spraying technologies.

Keywords: WC-Co-Cr coatings, HVOF technology, wear resistance, adhesion, corrosion resistance, thermal spraying.