

Д.А. Эскержанов^{1,2}, Р.К. Кусаинов^{1,2}, В.Н. Коц¹, К.Д. Орманбеков¹, А.Б. Шынарбек¹

¹Шәкәрім университет, Инжиниринговый центр,
071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глилки, 20 А

²Шәкәрім университет,
071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глилки, 20 А

*e-mail: dumanaskerzhanov541@gmail.com

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО КИСЛОРОДНО-ТОПЛИВНОГО НАПЫЛЕНИЯ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ УПРОЧНЕНИЯ И ВОССТАНОВЛЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ

Аннотация: В работе представлено комплексное исследование процесса формирования износостойких металллокерамических покрытий системы WC-Co, полученных методом высокоскоростного кислородно-топливного напыления (HVOF). Актуальность данного исследования обусловлена необходимостью разработки эффективных методов восстановления и упрочнения деталей специальной техники, эксплуатируемых в экстремальных условиях. В качестве материала подложки использовалась сталь 12X18H10T. Основное внимание уделено влиянию дистанции напыления (300 мм-400 мм) на физико-механические свойства слоев. С использованием методов XRD, SEM детально изучены микроструктура и фазовые превращения исследуемого покрытия. Установлено, что оптимизация параметров HVOF-процесса позволяет уменьшить уровень декарбидизацию WC до W_2C , сохраняя высокую концентрацию первичных твердых фаз в кобальтовой матрице. Экспериментально доказано, что сформированные покрытия обладают сверхплотной структурой с пористостью менее 1%. Результаты трибологических испытаний и электрохимической коррозии подтвердили высокое качество разработанных покрытий: микротвёрдость возросла в 7 раз, а скорость коррозии снизилась на порядок. Полученные данные расширяют научные представления о механизмах адгезионного и когезионного взаимодействия в композитах WC-Co и предлагают готовое технологическое решение для повышения ресурса узлов военной техники.

Ключевые слова: HVOF, WC-Co покрытия, микроструктура, износостойкость, коррозионная стойкость, упрочнение деталей, военная техника.

Введение

Детали военной техники – такие как шестерни, валы, поршни, направляющие втулки, элементы ствольных систем и гидроузлов – работают при высоких механических, термических и вибрационных нагрузках. Их износ, эрозия и коррозионное разрушение снижают надежность и ресурс техники. Традиционные методы восстановления, включая наплавку и гальваническое хромирование, часто сопровождаются дефектами, трещинами и внутренними напряжениями, а также экологическими ограничениями [1]. В этих условиях технология HVOF является современным решением, обеспечивающим формирование плотных, адгезионно прочных и износостойких покрытий без значительного перегрева подложки [2, 3].

Метод HVOF основан на сгорании топлива (керосин, пропан, водород) с кислородом в камере высокого давления, в результате чего образуется, струя газов со скоростью более 800-1200 м/с. Порошок, подаваемый в струю, нагревается и ускоряется, после чего осаждается на подложку, формируя слой с ламеллярной структурой (splat-based structure). Высокая кинетическая энергия частиц при относительно низкой температуре плавления обеспечивает минимальную пористость (<1-2%), высокую плотность и прочную адгезию покрытия [4, 5].

Наиболее широко для задач упрочнения применяются металллокерамические системы WC-Co, объединяющие твердость карбида вольфрама (до 2000-2200 HV) и вязкость металлической матрицы кобальта. Карбидная фаза обеспечивает высокую износостойкость и сопротивление микрорезанию, тогда как кобальтовая связка повышает ударную вязкость и

стойкость к растрескиванию [6, 7]. В результате покрытия WC-Co характеризуются отличным сочетанием твердости, сцепления и устойчивости к усталостным нагрузкам.

Исследования последних лет подтверждают эффективность HVOF-покрытий WC-Co для защиты и восстановления деталей военной и авиационной техники. Так, по данным Zhao et al. (2023), применение HVOF WC-Co позволило успешно заменить традиционное хромирование штоков гидроцилиндров, обеспечив повышение износостойкости в 2-3 раза и снижение трения на 30 % [8]. Аналогичные результаты показали испытания на поршнях и валах – покрытие сохраняло целостность после 10^6 циклов при контактных давлениях до 400 МПа [9].

В обзоре Bolelli и Lusvarghi (2021) подчеркивается, что HVOF-покрытия WC-Co имеют минимальную пористость, высокую адгезию (60-90 МПа) и микротвердость порядка 1200-1500 HV, что делает их эффективными для восстановления деталей, работающих при абразивно-эрозионном износе [10]. Sun et al. (2022) показали, что уменьшение расстояния между факелом и подложкой с 400 мм до 300 мм способствует уплотнению микроструктуры, уменьшению пористости до 0,8% и увеличению адгезии на 15% [11].

Однако чрезмерное повышение температуры газа может привести к частичной декарбидизации WC, образованию фаз W_2C и WO_3 , что ухудшает микротвердость и коррозионную стойкость [12]. Поэтому одной из ключевых задач разработки технологии является оптимизация параметров напыления – скорости подачи порошка, соотношения кислород/топливо, расстояния до подложки и температуры потока, чтобы достичь стабильной структуры и минимального окисления.

Покрытия WC-Co демонстрируют не только высокую износостойкость, но и коррозионную стойкость в агрессивных средах (NaCl, морская вода, сульфатные растворы), что делает их особенно перспективными для применения в деталях, контактирующих с влагой и морским воздухом [13]. Xu et al. (2024) показали, что в условиях морской атмосферы HVOF WC-Co покрытия сохраняют плотность структуры и коррозионную стойкость в течение 1000 ч испытаний, тогда как незащищенные образцы проявляли питтинговую коррозию уже через 72 ч [14].

С технологической точки зрения, HVOF-процесс удобен и для восстановления изношенных деталей, и для первичного упрочнения новых элементов. При восстановлении слой наносится для восполнения износа и восстановления геометрии, после чего покрытие служит защитным функциональным слоем. При упрочнении новых деталей метод позволяет создать прочный барьер против износа, эрозии и коррозии [15]. Таким образом, технология сочетает ремонтный и предупредительный подходы, что особенно ценно для военной техники, где требуется сочетание надежности и ремонтпригодности.

Методы исследования

Для выполнения данной задачи использовался порошок WC-Co с размером частиц 0-20 мкм. Покрытия наносились на квадратные образцы из нержавеющей стали 12X18H10T размером 5×5 мм и толщиной 4 мм. Поверхность образцов перед напылением шлифовали наждачной бумагой с зернистостью Р600 и подвергали пескоструйной обработке сжатым воздухом с абразивными частицами для формирования требуемой шероховатости. Далее проводили серию напылений при разных расстояниях от сопла – 300, 350 и 400 мм, продолжительность каждого напыления составляла 15 с. Остальные параметры оставались неизменными: напряжение 25 В, подача порошка 6 л/мин. Покрытия получали на установке SX-5000 (рис. 1), работающей по технологии HVOF. Высокоскоростной поток горячих газов, образующийся при сгорании пропана с кислородом, обеспечивал нагрев, ускорение и осаждение порошковых частиц, что приводило к формированию плотного адгезионно прочного покрытия.



Рисунок 1 – SX-5000 для получения покрытия методом HVOF

Фазовый состав покрытий определяли методом рентгеноструктурного анализа (РСА) на дифрактометре X'Pert PRO (PANalytical, Нидерланды) с использованием излучения Cu K α ($\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$). Съемку осуществляли в диапазоне углов $2\theta = 20-90^\circ$, с шагом $0,02^\circ$ и временем накопления 0,5 с на шаг. Обработка полученных дифрактограмм и идентификация фаз выполнялись с помощью программного обеспечения HighScore Plus.

Параметры микрогеометрии поверхности (шероховатость) определяли на профилометре Anytester HY2300. Микротвердость покрытий по Виккерсу измеряли на поперечных шлифах с использованием микротвердомера HLV-1DT (Vickers) при нагрузке 2 Н и времени выдержки под нагрузкой 10 с.

Трибологические характеристики исследовали на трибометре Anton Paar TRB3 в режиме «шар-по-плоскости». В качестве контртела использовался стальной шар диаметром 3 мм, изготовленный из стали 100X6 (аналог WX15). Образец располагали так, чтобы поверхность покрытия была перпендикулярна траектории движения шара. Радиус кривизны и глубина износа контролировались датчиком смещения, а коэффициент трения регистрировался во времени с помощью датчика компенсации трения. Испытания проводились на воздухе при нагрузке 10 Н, скорости скольжения 5 см/с, длине пути трения 100 мм и радиусе кривизны 1,5 мм.

Коррозионные испытания выполняли методом потенциодинамической поляризации с использованием потенциостата-гальваностата CS300M (Corrtest Instruments, Ухань, Китай) в стандартной трехэлектродной ячейке CS936 с плоским коррозионным элементом. Рабочим электродом служил образец покрытия с открытой площадью 1 см²; в качестве сравнения использовался насыщенный электрод Ag/AgCl, а в качестве противозэлектрода – платиновая сетка. Испытания проводили в 3,5% водном растворе NaCl при температуре $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$ после стабилизации потенциала открытой цепи в течение 30 минут.

Результаты и обсуждение

Рентгеновские дифрактограммы покрытий WC-Co, полученных методом высокоскоростного кислородно-топливного напыления (HVOF) при различных расстояниях от сопла до подложки – 300, 350 и 400 мм, представлены на **рисунке 2**. Во всех трех случаях на дифрактограммах отчетливо фиксируются пики, соответствующие основной фазе WC (гексагональная, пространственная группа P6m2). Наиболее интенсивные рефлексы наблюдаются при углах $2\theta \approx 31,6^\circ, 35,7^\circ, 48,4^\circ, 64,0^\circ, 73,2^\circ$ и $75,8^\circ$.

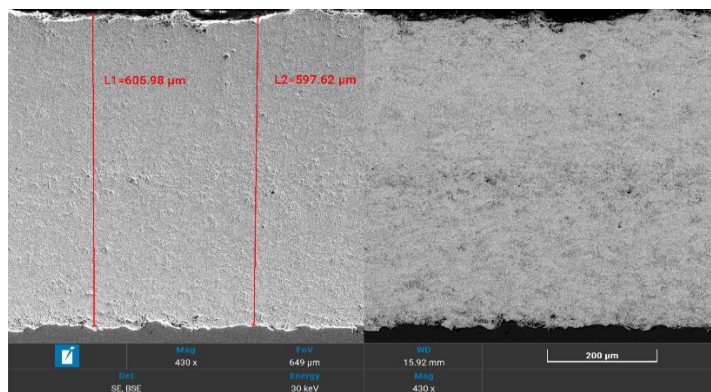
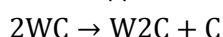


Рисунок 2 – СЭМ изображение структуре покрытия образца 400 мм

Помимо основной WC-фазы, на дифрактограммах всех образцов также присутствуют пики фазы W₂C, регистрируемые при $2\theta \approx 39,7^\circ$ и 74° , что свидетельствует о частичной декарбидизации WC в процессе напыления. Данный процесс связан с высокотемпературным воздействием газового потока и частичным взаимодействием WC с кислородом, при котором происходит потеря углерода и образование подстехиометрического карбида W₂C по реакции:



Появление W₂C фазы наблюдается во всех покрытиях, однако ее интенсивность возрастает при увеличении расстояния напыления от 300 до 400 мм. Это можно объяснить тем, что при больших расстояниях частицы дольше находятся в окислительной среде плазменного факела и подвергаются частичному перегреву и декарбидизации, несмотря на снижение их кинетической энергии [1, 10, 17].

Кроме того, на дифрактограммах покрытия, полученного при расстоянии 400 мм, фиксируются слабые пики, соответствующие металлическим фазам W (кубическая структура) и Co (гексагональная структура). Их присутствие указывает на частичное разложение карбидной фазы и кристаллизацию связующего кобальта. Это подтверждает, что при увеличении расстояния между соплом и подложкой возрастает степень декарбидизации, что приводит к формированию W и Co-богатых областей в матрице покрытия.

Отмечается также изменение относительной интенсивности пиков WC при увеличении расстояния напыления: с 300 до 400 мм наблюдается уменьшение интенсивности пиков WC и увеличение интенсивности пиков W_2C и W, что подтверждает рост степени термической деградации карбидной фазы [6]. Это связано с тем, что увеличение расстояния приводит к изменению температурно-кинетического баланса потока: частицы WC подвергаются длительному воздействию окислительной атмосферы, при этом происходит частичное испарение углерода и образование оксидов в поверхностных слоях частиц.

Согласно результатам, Sun et al. (2022), подобное перераспределение фаз может существенно влиять на механические характеристики: при увеличении доли W_2C и W твердость покрытия снижается, поскольку эти фазы имеют меньшую твердость (~2200 HV и ~350 HV соответственно) по сравнению с WC (~2800 HV) [18]. Таким образом, наблюдаемые фазовые изменения объясняют последующее снижение микротвердости и износостойкости, особенно для покрытия, полученного при 400 мм.

Покрyтия WC-Co, полученные методом высокоскоростного кислородно-топливного напыления (HVOF) при различных расстояниях от сопла до подложки – 300, 350 и 400 мм, были исследованы с точки зрения параметров шероховатости поверхности. Измерения шероховатости проводились с использованием профилометра Anytester HY2300.

Установлено, что при расстоянии напыления 300 мм среднее значение параметра Ra составляет 3,54 мкм, а параметра Rz – 18,59 мкм. При увеличении расстояния напыления до 350 мм наблюдается снижение шероховатости поверхности: значения Ra и Rz уменьшаются до 3,29 мкм и 18,20 мкм соответственно, что указывает на наиболее благоприятные условия формирования покрытия.

Дальнейшее увеличение расстояния напыления до 400 мм приводит к заметному росту шероховатости поверхности. В этом случае значение параметра Ra возрастает до 3,94 мкм, а параметр Rz – до 20,53 мкм. Увеличение шероховатости при большем расстоянии напыления связано с частичным охлаждением частиц порошка WC-Co в газовом потоке и снижением их кинетической и тепловой энергии. В результате уменьшается степень пластической деформации частиц при ударе о подложку, что приводит к формированию менее плотной и более грубой микроструктуры покрытия с увеличенным числом неровностей и микропор [19, 20].

Результаты измерения микротвердости покрытий WC-Co, полученных методом HVOF при различных расстояниях распыления (300, 350 и 400 мм), представлены на рисунке 3а. Для сравнения исходная подложка из стали 12X18H10T имела микротвердость около 170 HV, что соответствует значению аустенитных нержавеющей сталей. После нанесения покрытия наблюдается значительное повышение твердости – до 1197 HV при 300 мм, 1003 HV при 350 мм и 862 HV при 400 мм. Таким образом, прочность покрытий превышает показатель подложки более чем в 6-7 раз, что подтверждает формирование плотной карбидной структуры с высокой степенью адгезии и сплошностью.

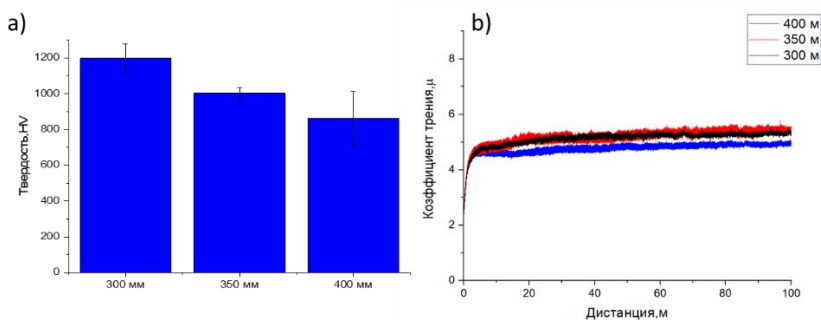


Рисунок 3 – Результаты механических и трибологических испытаний стали марки 45 и полученных покрытий: а) твердость б) коэффициент трения

Максимальное значение твердости при 300 мм объясняется тем, что при меньшем расстоянии частицы порошка WC-Co достигают поверхности подложки с высокой кинетической энергией и в полу- или полностью расплавленном состоянии. Это способствует интенсивному сплющиванию частиц и формированию плотной ламеллярной структуры с минимальной пористостью и высоким содержанием WC-фазы. При увеличении расстояния до 350 и 400 мм наблюдается постепенное снижение твердости, обусловленное частичной декарбидизацией $WC \rightarrow W_2C$ и образованием металлической связи Co/W, что согласуется с данными рентгенофазового анализа. Увеличение расстояния сопровождается также уменьшением тепловой и кинетической энергии частиц, что ухудшает степень спекания и снижает общую плотность покрытия.

На рисунке 3б представлены результаты трибологических испытаний покрытий WC-Co при различных расстояниях напыления. Из графика зависимости коэффициента трения от дистанции скольжения (до 100 м) видно, что значения коэффициента трения составляют $\mu = 0,513$ (300 мм), $\mu = 0,520$ (350 мм) и $\mu = 0,477$ (400 мм). После короткой стадии приработки (до 10 м) коэффициент трения стабилизируется, формируя устойчивое плато для всех образцов.

Несмотря на то что при 400 мм наблюдается несколько меньшее значение μ , это не свидетельствует о лучшем качестве покрытия. Более низкий коэффициент трения в данном случае обусловлен не повышением плотности, а наличием поверхностных пор и слабосвязанных частиц, что способствует образованию вторичных трибопленок и снижает реальную площадь контакта [21]. Покрытие, полученное при 300-350 мм, демонстрирует более стабильное и предсказуемое трение, что связано с оптимальным сочетанием твердости и когезионной прочности.

Полученные результаты хорошо коррелируют с литературными данными, согласно которым для WC-Co покрытий, полученных методом HVOF, диапазон коэффициента трения составляет 0,45-0,55 в условиях сухого скольжения против стали, и сильно зависит от микроструктуры и содержания WC-фазы [22]. Более высокая твердость покрытия при 300 мм обуславливает устойчивое сопротивление пластической деформации и, как следствие, более равномерное распределение износа.

Коррозионная стойкость покрытий WC-Co, полученных методом высокоскоростного кислородно-топливного напыления (HVOF), была исследована методом потенциодинамической поляризации в 3,5 % растворе NaCl. Основные параметры, включая плотность коррозионного тока (I_k), коррозионный потенциал (E_k) и скорость коррозии, представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты расчета коррозионных параметров образцов

Образец	I_k , мкА/см ²	E_k , В	Скорость коррозии, мм/год
300 мм	2.58×10^{-5}	– 0.077	0.303
350 мм	3.45×10^{-5}	– 0.208	0.405
400 мм	6.90×10^{-5}	– 0.191	0.809

Как видно из результатов, покрытия, полученные при расстоянии 300 мм, обладают наилучшей коррозионной стойкостью – минимальной плотностью коррозионного тока (2.6×10^{-5} мкА/см²) и наиболее положительным потенциалом (– 0.077 В). Это свидетельствует о плотной и однородной микроструктуре покрытия, характеризующейся минимальным числом пор и микротрещин, что затрудняет диффузию электролита к поверхности подложки. При увеличении расстояния до 350 и 400 мм плотность коррозионного тока возрастает более чем в 2,5 раза, а скорость коррозии увеличивается с 0.30 до 0.81 мм/год, что связано с ростом пористости и ухудшением связности слоев покрытия.

Такая зависимость объясняется тем, что при увеличении расстояния от сопла до подложки снижается температура и скорость частиц, что приводит к неполной пластической деформации и частичному окислению WC-частиц в процессе напыления. В результате в покрытии формируются микропоры и границы слабого сцепления, через которые агрессивные ионы Cl^- и H^+ могут проникать вглубь структуры, ускоряя процессы электрохимической деградации [23].

Согласно исследованиям, Guo et al. (2024) и Zhao et al. (2023), коррозионное поведение WC-Co покрытий определяется сочетанием трех факторов:

- (1) плотностью и пористостью структуры;
- (2) содержанием оксидных фаз (WO_3 , CoO);
- (3) распределением связующего кобальта, склонного к локальной анодной коррозии [16,24].

При увеличении расстояния напыления концентрация этих оксидов возрастает вследствие более длительного пребывания частиц в окислительной среде, что способствует формированию гальванических микропар WC/Co-оксиды и ускоряет растворение связующего.

На рисунке 2 представлено СЭМ-изображение поперечного сечения покрытия WC-Co, сформированного методом высокоскоростного кислородно-топливного напыления (HVOF) при расстоянии от сопла до подложки 400 мм. Покрытие характеризуется слоистой ламеллярной структурой, однако в его объеме наблюдается повышенное количество микропор и межламеллярных зазоров, что указывает на снижение плотности по сравнению с покрытиями, полученными при меньших расстояниях напыления. Средняя толщина покрытия составляет порядка 590-600 мкм, что свидетельствует о стабильности процесса напыления. Вместе с тем увеличение расстояния напыления приводит к снижению степени пластической деформации частиц WC-Co при их ударе о подложку. Это связано с частичным охлаждением частиц в газовом потоке и уменьшением их кинетической и тепловой энергии, в результате чего формируется менее плотная микроструктура с повышенной шероховатостью поверхности.

Наличие микропор и зон ослабленного сцепления, выявленных на СЭМ-изображении, хорошо согласуется с результатами коррозионных и механических испытаний. Для покрытия, полученного при 400 мм, зафиксированы повышенная плотность коррозионного тока и максимальная скорость коррозии, а также снижение микротвердости до 862 HV, что обусловлено ростом пористости и частичной термической деградацией WC-фазы. Данные особенности структуры также объясняют менее стабильное трибологическое поведение покрытия и формирование вторичных трибопленок в процессе сухого скольжения. Более положительные значения E_k и меньшие значения I_k для образцов, полученных при 300 мм, указывают на наличие пассивного состояния поверхности – образование тонкой защитной оксидной пленки, которая тормозит анодные процессы растворения. При больших расстояниях структура покрытия становится менее плотной, пленка разрушается неравномерно.

Заключение

В ходе исследования разработана оптимальная технология получения металлокерамических покрытий WC-Co методом высокоскоростного кислородно-топливного напыления (HVOF) для восстановления и упрочнения деталей военной техники. Анализ микроструктуры, выполненный методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), показал, что при расстоянии напыления 350 мм формируется наиболее плотная и равномерная ламеллярная структура покрытия с минимальным количеством межламеллярных зазоров и микропор. Значение пористости в этом случае составило $0,18 \pm 0,03\%$, тогда как при увеличении расстояния до 400 мм наблюдался рост пористости до $0,41 \pm 0,05\%$, что связано с неполной пластической деформацией частиц и ухудшением связности слоёв покрытия. Рентгенофазовый анализ выявил сохранение основной карбидной фазы WC с частичным присутствием фазы W_2C , что обусловлено процессами декарбюризации при повышенной температуре и длительном пребывании частиц в высокотемпературном потоке. СЭМ-изображения поперечного сечения покрытий дополнительно подтвердили увеличение числа микропор и зон ослабленного сцепления при расстоянии напыления 400 мм, что согласуется с результатами фазового анализа.

Средняя микротвёрдость покрытий, полученных при оптимальном расстоянии 350 мм, составила (1003 ± 35) HV, что более чем в 6 раз превышает микротвёрдость исходной стали 12X18H10T (≈ 180 HV). Трибологические испытания показали снижение среднего коэффициента трения до $\mu = 0,52 \pm 0,01$ и уменьшение диаметра изношенного следа до $(0,71 \pm 0,02)$ мм, что на 12–15 % ниже по сравнению с покрытиями, полученными при других режимах напыления. Коррозионные испытания подтвердили, что покрытия, сформированные при расстоянии напыления 350 мм, обладают наилучшей коррозионной стойкостью: плотность коррозионного тока составила $(3,3 \pm 0,2) \times 10^{-5}$ мкА/см², а скорость коррозии не превышала $0,39 \pm 0,03$ мм/год. Повышенная коррозионная стойкость напрямую связана с

плотной микроструктурой покрытия, выявленной методами СЭМ, и минимальным количеством дефектов, препятствующих проникновению агрессивных ионов к поверхности подложки. Установлено, что оптимальное сочетание минимальной пористости, высокой микротвёрдости, низкого коэффициента трения и плотной микроструктуры, подтверждённой СЭМ-анализом, обеспечивает повышение эксплуатационной надёжности покрытий WC-Co, что делает их перспективными для упрочнения и восстановления деталей, работающих в условиях высоких механических нагрузок и интенсивного износа.

Список литературы

1. Pawlowski L. The science and engineering of thermal spray coatings / L. Pawlowski // John Wiley & Sons. – 2008.
2. An Innovative Review on Protective Coatings Counting Future Trends of Hot Corrosion Prevention / D. Singh et al // National Conference on Advanced and Emerging Materials for Technological Applications. – Singapore: Springer Nature Singapore. – 2024. – P. 223-240.
3. Prashar G. Laser Surface Engineering: State of the Art, Applications, and Challenges / G. Prashar, H. Vasudev // Handbook of Laser-Based Sustainable Surface Modification and Manufacturing Techniques. – 2023. – P. 105-126.
4. Bolelli G. High velocity oxy-fuel (HVOF) coatings: processing – structure – performance relationship / G. Bolelli, L. Lusvardi // J. Therm. Spray Technol. – 2021.
5. Kalush A. Comparison of the oxidation behavior and microstructural evolution of NiCoCrAlY coatings processed via HVOF and APS: дис. – École de technologie supérieure, 2025.
6. Torkashvand K. Advances in thermally sprayed WC-based wear-resistant coatings: co-free binders, processing routes and tribological behavior / K. Torkashvand, S. Joshi, M. Gupta // Journal of Thermal Spray Technology. – 2022. – Т. 31, № 3. – P. 342-377.
7. Properties, Advantages, and Prospects of Using Cobalt-Free Composites Based on Tungsten Carbide in Industry / S. Kurbanbekov et al // Materials. – 2024. – Т. 18, № 1. – P. 129.
8. Wear and corrosion of HVOF and HVOF-sprayed WC-CoCr coatings on aluminum alloy / T.A. Owoseni et al // Journal of Thermal Spray Technology. – 2025. – Т. 34, № 2. – P. 970-991.
9. Fatigue and tribological response of WC-Co coatings on steel substrates / S. Ramesh et al // Wear. – 2024.
10. Prashar G. Influence of heat treatment on surface properties of HVOF deposited WC and Ni-based powder coatings: a review / G. Prashar, H. Vasudev, L. Thakur // Surface Topography: Metrology and Properties. – 2021. – Т. 9, № 4. – P. 043002.
11. Effect of spray angle and substrate material on formation mechanisms and properties of HVOF sprayed coatings / A.G. Fefekos et al // Surface and Coatings Technology. – 2023. – Т. 452. – P. 129115.
12. Performance of thermal-sprayed coatings to combat hot corrosion of coal-fired boiler tube and effect of process parameters and post-coating heat treatment on coating performance: a review / S. Kumar et al // Surface Engineering. – 2021. – Т. 37, № 7. – P. 833-860.
13. Verma P.K. Improving the Corrosion Performance of SS 304 Stainless Steel Using HVOF-Sprayed WC-Co-Cr Coatings in Chloride Environments / P.K. Verma, H. Vasudev, G. Singh // Journal of Bio-and Tribo-Corrosion. – 2025. – Т. 11, № 4. – P. 1-13.
14. Behaviors and mechanism of HVOF/HVOF sprayed WC-co-Cr coatings subjected to cavitation in marine environments / Y. Li et al // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2025. – Т. 34, № 12. – P. 10973-10989.
15. Advanced HVOF-Sprayed Carbide Cermet Coatings as Environmentally Friendly Solutions for Tribological Applications: Research Progress and Current Limitations / B. Ben Difallah et al // Technologies. – 2025. – Т. 13, № 7. – P. 281.
16. Trade-off among cavitation erosion resistance, corrosion resistance, and antifouling properties of HVOF-sprayed WC-CoCr coating via adding stainless steel and copper / Z. Guo et al // Journal of Thermal Spray Technology. – 2024. – Т. 33, № 5. – P. 1570-1584.
17. Effect of Binder on Oxidation Properties of Tungsten Carbides: A Review by a Conceptual Classification Approach / Z. Fathipour et al // Ceramics. – 2024. – Т. 7, № 1. – P. 166-191.
18. Effect of WB doping on microstructure and mechanical properties of HVOF sprayed Fe-based amorphous coatings under irradiation environment / K. Sun et al // Journal of Alloys and Compounds. – 2025. – Т. 1021. – P. 179572.

19. An influence of oxygen flow rate and spray distance on the porosity of HVOF coating and its effects on corrosion – a review / A. Raza et al // Materials. – 2022. – Т. 15, № 18. – P. 6329.
20. Friction and wear behavior of laser cladded WC-Co and Ni/WC-Co deposits at high temperature / M. Erfanmanesh et al // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2019. – Т. 81. – P. 137-148.
21. Enhancing the wear and high-temperature oxidation behavior of NiCrBSi coatings by collaboratively adding WC and Cr₃C₂ / X. Sun et al // Surface and Coatings Technology. – 2023. – Т. 473. – P. 129968.
22. Effect of crystallization on electrochemical and tribological properties of high-velocity oxygen fuel (HVOF)-sprayed Fe-based amorphous coatings / A.Q. Abbas et al // AppliedChem. – 2024. – Т. 4, № 3. – P. 270-281.
23. Influence of Cr addition on tribocorrosion behavior of high velocity oxygen-fuel thermal sprayed WC-based cermet coatings / T. Li et al // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2025. – Т. 128. – P. 107050.
24. An investigation of the effect of post heat treatment on the wear and corrosion behavior of HVOF-sprayed WC-10Co4Cr coatings / L. Zhao et al // Journal of Thermal Spray Technology. – 2023. – Т. 32, № 8. – P. 2394-2410.

Финансирование

Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № BR24992870).

Д.А. Әскержанов^{1,2*}, Р.К. Кусаинов^{1,2}, В.Н. Коц¹, К.Д. Орманбеков¹, А.Б. Шынарбек¹

¹Шәкәрім университеті, Инжиниринг орталығы,
071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинка, 20 А

²Шәкәрім университеті,
071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинка, 20 А
*e-mail: dumanaskerzhanov541@gmail.com.

ӘСКЕРИ ТЕХНИКАНЫҢ БӨЛШЕКТЕРІН НЫҒАЙТУ ЖӘНЕ ҚАЛПЫНА КЕЛТІРУ ҮШІН МЕТАЛЛОКЕРАМИКАЛЫҚ ЖАБЫНДАРДЫ ЖОҒАРЫ ЖЫЛДАМДЫҚТЫ ОТТЕГІ-ОТЫНДЫҚ НАПЫЛЕУ ТЕХНОЛОГИЯСЫН ӨЗІРЛЕУ

Жұмыста әскери техниканың бөлшектерін нығайту және қалпына келтіруге арналған WC-Co металлкерамикалық жабындарын жоғары жылдамдықты оттегі-отындық (HVOF) әдісімен алу технологиясы әзірленіп, эксперименттік түрде негізделді. Жабындар 12X18H10T маркалы тотбаспайтын болаттан жасалған негіздерге әртүрлі қашықтықтарында (300-400 мм) қалыптастырылды. Алынған жабындардың микроқұрылымы, фазалық құрамы, бетінің кедір-бұдырлығы, микроқаттылығы, трибологиялық және коррозиялық қасиеттері зерттелді. Жабын алу қашықтығы WC-Co жабындарының құрылымының қалыптасуына және эксплуатациялық қасиеттеріне шешуші әсер ететіні анықталды. Оңтайлы режимі минималды кеуектілігі бар тығыз ламеллярлы құрылымның түзілуін, негізгі WC карбидтік фазасының сақталуын және W₂C-ке дейінгі декарбидизацияның шектелуін қамтамасыз етеді. Жабындардың микроқаттылығы бастапқы болатпен салыстырғанда 6-7 есе жоғары екені, ал үйкеліс коэффициенті мен коррозия жылдамдығының айтарлықтай төмендейтіні көрсетілді. Алынған нәтижелер жоғары механикалық және агрессивті әсерлер жағдайында жұмыс істейтін әскери техника бөлшектерінің тозуға төзімділігін, коррозияға төзімділігін және эксплуатациялық сенімділігін арттыру үшін WC-Co негізіндегі HVOF-жабындардың перспективалылығын дәлелдейді.

Түйін сөздер: HVOF, WC-Co жабындары, микроқұрылым, тозуға төзімділік, коррозияға төзімділік, бөлшектерді нығайту, әскери техника.

D.A. Askerzhanov^{1,2*}, R.K. Kussainov^{1,2}, V.N. Kots¹, K.D. Ormanbekov¹, A.B. Shynarbek¹

¹Shakarim University of Semey, Engineering Center,
071412, Republic of Kazakhstan, Semey, 20A Glinka St.

²Shakarim University of Semey,
071412, Republic of Kazakhstan, Semey, 20A Glinka St.
*e-mail: dumanaskerzhanov541@gmail.com

DEVELOPMENT OF HIGH-VELOCITY OXYGEN-FUEL SPRAYING TECHNOLOGY FOR METAL-CERAMIC COATINGS FOR STRENGTHENING AND RESTORATION OF MILITARY EQUIPMENT COMPONENTS

This work presents the development and experimental validation of a technology for producing WC-Co metal-ceramic coatings by high-velocity oxygen-fuel (HVOF) spraying, intended for strengthening and restoring components of military equipment. The coatings were deposited on 12Kh18N10T stainless steel substrates at various spraying distances (300-400 mm). The microstructure, phase composition, surface roughness, microhardness, as well as the tribological and corrosion properties of the obtained coatings were investigated. It was established that the spraying distance has a decisive effect on the formation of the coating structure and its service properties. The optimal spraying regime ensures the formation of a dense lamellar structure with minimal porosity, preservation of the primary WC carbide phase, and limited decarburization to W_2C . It was shown that the microhardness of the coatings is 6-7 times higher than that of the base steel, while the friction coefficient and corrosion rate are significantly reduced compared to the substrate. The obtained results confirm the prospects of WC-Co HVOF coatings for improving the wear resistance, corrosion resistance, and operational reliability of military equipment components operating under high mechanical loads and aggressive environments.

Key words: HVOF, WC-Co coatings, microstructure, wear resistance, corrosion resistance, surface strengthening, military equipment.

Авторлар туралы мәліметтер

Думан Аңсағанұлы Әскержанов* – «Техникалық физика» мамандығының магистранты, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы, Инжиниринг орталықтың ғылыми қызметкері; e-mail: dumanaskerzhanov541@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3706-4087>.

Ринат Кенжеевич Кусаинов – Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы, Инжиниринг орталықтың жетекшісі; e-mail: rinat.k.kus@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5166-4761>.

Владислав Николаевич Коц – «Машина жасау» мамандығы бойынша магистрант, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы, Инжиниринг орталығының ғылыми қызметкері; e-mail: kotsvladislav1@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5312-9719>.

Куаныш Даулетович Орманбеков – «Технологиялық машиналар мен жабдықтар» мамандығының докторанты, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы, Инжиниринг орталықтың «Материалдар бетін өңдеудің плазмалық технологиялары» зертханасының меңгерушісі; e-mail: kuanysh.dauletson@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6099-2812>.

Айбек Бақытжанұлы Шынарбек – «Технологиялық машиналар мен жабдықтар» мамандығының докторанты, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы, Инжиниринг орталықтың «Материалтану және материалдар беттерін модификациялаудың электролиттік-плазмалық технологиялары» зертханасының меңгерушісі; e-mail: shinarbekov16@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-2877-5178>.

Сведения об авторах

Думан Ансаганұлы Әскержанов* – магистрант по специальности «Техническая физика», Шәкәрім университет, Республика Казахстан, научный сотрудник Инжинирингового центра; e-mail: dumanaskerzhanov541@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3706-4087>.

Ринат Кенжеевич Кусаинов – Шәкәрім университет, Республика Казахстан, руководитель Инжинирингового центра; e-mail: rinat.k.kus@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5166-4761>.

Владислав Николаевич Коц – студент, магистрант по специальности «Машиностроение», Шәкәрім университет, Республика Казахстан, научный сотрудник Инжинирингового центра; e-mail: kotsvladislav1@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5312-9719>.

Куаныш Даулетович Орманбеков – докторант по специальности «Технологические машины и оборудование», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; заведующий лабораторией «Плазменные технологии обработки поверхности материалов» Инжинирингового центра; e-mail: kuanysh.dauletson@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6099-2812>.

Айбек Бақытжанұлы Шынарбек – докторант по специальности «Технологические машины и оборудование», Шәкәрім университет, Республика Казахстан, заведующий лабораторией «Электролитно-плазменные технологии модификации поверхности материалов и материаловедения» Инжинирингового центра; e-mail: shinarbekov16@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-2877-5178>.

Information about the Authors

Duman Ansaganuly Askerzhanov* – Master's student in Technical Physics, Shakarim University, Republic of Kazakhstan, Research Fellow at the Engineering Center; e-mail: dumanaskerzhanov541@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3706-4087>.

Rinat Kenzheevich Kusainov – Shakarim University, Republic of Kazakhstan, Head of the Engineering Center; e-mail: rinat.k.kus@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5166-4761>.

Vladislav Kots – master's student in the field of «Mechanical Engineering», Shakarim University, Republic of Kazakhstan, research fellow at the Engineering Center; e-mail: kotsvladislav1@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5312-9719>.

Kuanysht Dauletovich Ormanbekov – PhD student in Technological Machines and Equipment, Shakarim University, Republic of Kazakhstan, Head of the Plasma Technologies for Materials Surface Treatment Laboratory at the Engineering Center; e-mail: kuanysht.dauletson@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6099-2812>.

Aibek Bakytzhanuly Shynarbek – PhD student in Technological Machines and Equipment, Shakarim University, Republic of Kazakhstan; Head of the Electrolytic – Plasma Technologies for Materials Surface Modification and Materials Science Laboratory at the Engineering Center; e-mail: shynarbekov16@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-2877-5178>.

Поступила в редакцию 05.01.2026

Поступила после доработки 23.02.2026

Принята к публикации 05.03.2026

[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1\(21\)-30](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-30)

МРНТИ: 55.03.07; 55.03.45



Т.С. Жылқыбаев*, Р.А. Советбаев¹, Г.М. Кудайбергенова¹, Е.Р. Советбаев¹, К. Ожмегов²

¹Шәкәрім университеті,

Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20 А

²Ченстоховский политехнический университет,

42-201, Республика Польша, г. Ченстохова, ул. Х. Домбровского 69

*e-mail: tursynhan.jylqybaev@shakarim.kz

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЗАЗОРОВ В МЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕДАЧАХ НА ТОЧНОСТЬ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ПРИВОДА

Аннотация: В работе исследовано влияние зазоров в механических передачах на точность позиционирования привода. Актуальность исследования обусловлена тем, что наличие люфта в зубчатых, червячных и винтовых передачах является конструктивно неизбежным следствием технологических допусков, условий сборки и эксплуатационного износа и оказывает существенное влияние на кинематические и динамические характеристики приводных систем.

Разработана математическая модель электромеханического привода с учетом нелинейного кинематического элемента типа «люфт». Модель реализована в среде MATLAB/Simulink и включает пропорциональный регулятор положения, инерционную механическую подсистему с учетом демпфирования, а также блок моделирования зазора с заданной шириной мертвой зоны. Проведено численное параметрическое исследование при различных значениях величины зазора.

В ходе моделирования получены переходные характеристики, временные зависимости ошибки позиционирования и гистерезисные диаграммы. Установлено, что увеличение величины зазора приводит к росту максимальной динамической ошибки привода, особенно выраженной в режимах реверса движения. Показано, что в исследуемом диапазоне зависимость максимальной ошибки от параметра Δ носит монотонный характер и близка к линейной. Построенная гистерезисная характеристика подтверждает нелинейную природу рассматриваемого явления и демонстрирует формирование зоны нечувствительности шириной 2Δ .

Научная новизна работы заключается в количественной оценке зависимости максимальной динамической ошибки позиционирования от величины зазора на основе единой нелинейной динамической модели привода, а также в комплексном анализе влияния люфта с использованием переходных характеристик и гистерезисных диаграмм.

Полученные результаты позволяют количественно оценивать допустимую величину зазора при проектировании приводов высокоточных механизмов и могут служить основой для разработки алгоритмических или конструктивных методов компенсации люфта.

Ключевые слова: люфт, механическая передача, позиционирование, динамическая погрешность, гистерезис, нелинейность, приводные системы.