

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2025-3-14-24>

УДК 621.793.71

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ФАЗОВЫЙ СОСТАВ ПОКРЫТИЙ $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ HVOF: ОБЗОР

Ш. Р. Курбанбеков^{1,2}, Д. Э. Балтабаева^{1,2*}, Б. Ж. Сейтов¹, Ю. О. Амангельдиева¹, А. Н. Әбдімүтәліп¹

¹ *Международный казахско-турецкий университет имени Х.А. Ясави, Туркестан, Казахстан*

² *ТОО «Институт инновационных технологий и новых материалов», Туркестан, Казахстан*

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

В данной обзорной работе проводится детальный анализ влияния параметров высокоскоростного газопламенного напыления (HVOF) на формирование микроструктуры и эксплуатационные характеристики покрытий на основе карбида хрома в связке с никель-хромом ($\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$). Исследуются фазовые составы, включая плотность, пористость, адгезионную прочность и микротвердость, определяющие механическое поведение покрытия при интенсивных внешних нагрузках. Особое внимание уделяется механизму износостойкости, прочности сцепления с подложкой и сопротивлению усталостному разрушению, что критично для эксплуатации в условиях экстремальных механических воздействий. Рассматривается влияние различных режимов HVOF-напыления на фазовые особенности покрытий, а также их корреляция с эксплуатационными характеристиками. На основе проведенного анализа формулируются перспективные направления применения $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ покрытий в авиационной, энергетической и машиностроительной отраслях, требующих сочетания высокой износостойкости и термической стойкости.

Ключевые слова: метод HVOF, покрытия $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$, физико-механические свойства, XRD, коэффициент трения.

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия наблюдается стремительное развитие поверхностной инженерии, обусловленное возрастающими требованиями к материалам, работающим в экстремальных условиях эксплуатации – высоких температурах, агрессивных химических средах, механических нагрузках и радиационном облучении. Такие условия характерны для ключевых отраслей – авиационной, энергетической, нефтехимической и особенно ядерной промышленности, где надёжность и долговечность конструктивных материалов напрямую влияют на безопасность и эффективность технологических процессов [1].

Современные тенденции в области науки о материалах и нанотехнологий способствуют разработке новых методов обработки поверхности с целью улучшения физико-механических свойств материалов. Широко применяются физические (HVOF, плазменное и магнетронное напыление) и химическое осаждение из газовой фазы (CVD, электрохимическое осаждение, сол-гель и лазерное напыление) методы нанесения покрытий. Особое внимание уделяется композиционным металлокерамическим покрытиям на основе $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$, обладающим высокой адгезией, низкой пористостью, износо- и коррозионной стойкостью, а также низкой проницаемостью для водорода [2–3].

Таблица 1 содержит сравнительный анализ различных методов поверхностного осаждения, выделяя ключевые параметры, такие как температура осаждения, толщина покрытия и основные характеристики.

Методы включают физические, химические и термические методы напыления, каждый из которых предлагает уникальные преимущества с точки зрения адгезии, пористости, эффективности процесса и универсальности материала. Понимание этих различий помогает выбрать наиболее подходящий метод для конкретных промышленных применений, таких как аэрокосмическая, автомобильная и энергетическая отрасли.

Одним из наиболее эффективных методов является HVOF, который обеспечивает плотные, равномерные покрытия с минимальным окислением. По сравнению с другими методами термического напыления (APS, SPS (суспензионное плазменное напыление), плазменное напыление, дуговое напыление и др.) HVOF демонстрирует лучшие характеристики по твердости, адгезии и износостойкости. При этом температурная нагрузка на подложку снижается, что уменьшает риск её термического повреждения [26–28].

Особый интерес вызывают металлокерамические композиции на основе $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$, которые обладают уникальным сочетанием высокой твердости, хорошей коррозионной устойчивости и термостойкости. За счёт образования стабильной защитной фазы Cr_2O_3 при окислении такие покрытия эффективно препятствуют проникновению водорода и кислорода к подложке, снижая риск охрупчивания и деградации материала. Это делает $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ особенно перспективным для защиты циркониевых сплавов – одного из ключевых материалов в ядерной энергетике [29–30].

**ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ФАЗОВЫЙ СОСТАВ ПОКРЫТИЙ $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{--NiCr}$,
ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ HVOF: ОБЗОР**

Таблица 1. Сравнение различных методов осаждения

№	Метод нанесения	Температура нанесения (°C)	Толщина покрытия (мкм)	Преимущества	Недостатки	Примеры покрытий	Ссылки
1	D-Gun напыление	1000–1200	100–500	высокая прочность и плотность покрытия, отличная адгезия	высокая стоимость оборудования, ограниченная масштабируемость	$\text{Cr}_3\text{C}_2\text{--NiCr}$, WC–Co	[4–5]
2	Холодное напыление	<400	50–1000	низкая температура – нет термического повреждения подложки, высокая плотность	не подходит для всех материалов, требует высокой скорости частиц	Al–Ni, Ti–Cu, Cr–Ni	[6–7]
3	Плазменное напыление	10,000–15,000 (температура плазмы)	50–500	универсальность, подходит для тугоплавких материалов	высокие энергозатраты, возможна пористость	$\text{ZrO}_2\text{--Y}_2\text{O}_3$, $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{--NiCr}$	[8–9]
4	HVOF	1000–3000	50–500	высокая плотность и адгезия, низкая пористость, высокая твердость	необходимость в точном контроле параметров, шумность процесса	$\text{Cr}_3\text{C}_2\text{--NiCr}$, WC–Co, Al_2O_3	[10–12]
5	HVAF	900–1600	30–400	меньшее окисление по сравнению с HVOF, высокая производительность	ограничения по типу газов и порошков	WC–CoCr, $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{--NiCr}$	[13–14]
6	PVD	<1000	0.5–10	тонкие и плотные покрытия, высокая чистота	ограниченная толщина, требует вакуума	TiN, CrN, ZrCN	[15]
7	CVD	500–1100	1–50	хорошая адгезия, покрытие сложной формы	высокая температура, возможная диффузия в подложку	SiC, TiC, TiN	[16–17]
8	Термическое напыление	500–3000	100–500	простота и универсальность	низкая плотность, пористость покрытия	$\text{Cr}_3\text{C}_2\text{--NiCr}$, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--TiO}_2$	[18–19]
9	Многодуговое ионное покрытие (MAIP)	200–1000	1–10	высокая плотность, высокая скорость осаждения	арковая нестабильность, капельные включения	TiN, ZrN, CrAlN	[20–21]
10	Микродуговое оксидирование (MDO)	200–1000	10–200	формирование керамических покрытий in-situ, отличная коррозионная стойкость	ограничения по материалам (алюминий, титан, магний), шероховатая поверхность	Al_2O_3 , TiO_2	[22]
11	Лазерное напыление	800–2500	100–2000	локальное управление структурой, минимальное термическое искажение	дороговизна оборудования, сложность настройки	NiCrBSi, WC–Ni, TiC–Ni	[23]
12	Золь-гелевое покрытие	комнатная – 800	0.1–10	простота процесса, наноструктурирование	низкая механическая прочность, трещинообразование	SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2	[24]
13	Магнетронное напыление	комнатная – 500	0.1–5	хорошая однородность, контроль толщины, промышленное применение	требуется вакуум, низкая скорость осаждения	CrN, TiN, ZrCN	[25]

Циркониевые сплавы (в том числе циркалоиды) широко применяются в качестве оболочек твэлов благодаря их низкому сечению захвата тепловых нейтронов и высокой коррозионной стойкости в нормальных условиях. Однако при аварийных ситуациях и длительной эксплуатации в реакторе они подвергаются наводороживанию и интенсивному высокотемпературному окислению, что приводит к образованию хрупких гидридов и разрушению оксидных защитных плёнок. Всё это существенно снижает надёжность и срок службы конструктивных компонентов [31–33].

С учётом этого обеспечение эффективной защиты циркониевых сплавов от водородопроницаемости и окисления является актуальной научной и практической задачей. Металлокерамические покрытия, полученные методом HVOF, рассматриваются как одно из наиболее жизнеспособных решений, способных

обеспечить долговременную защиту при воздействии высоких температур и водяного пара [34–35].

Несмотря на большое количество публикаций, посвящённых термически напыляемым покрытиям, анализ литературы показывает, что большинство работ сосредоточены на изучении отдельных аспектов – параметров напыления, трибологических характеристик или стойкости к коррозии. Обзорные статьи, такие как Singh et al. (2020), Li et al. (2019), Zhang et al. (2021), подробно рассматривают технологии HVOF и составы порошков, но не затрагивают комплексный анализ деградационных механизмов и поведения покрытий $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{--NiCr}$ на циркониевых подложках в условиях, приближенных к эксплуатации в ядерных реакторах [36–38].

Кроме того, остаются недостаточно изученными такие важные аспекты, как влияние остаточных напряжений и пористости на термостойкость, цикличе-

скую стабильность и устойчивость к трещинообразованию в водородной среде. Существует также противоречие в литературных данных по поводу поведения $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{--NiCr}$ при длительном термическом воздействии, особенно в условиях циклического нагрева и охлаждения. Это указывает на необходимость систематизации накопленного экспериментального и моделируемого материала с целью выявления ключевых факторов, определяющих эффективность защитных покрытий.

Настоящий обзор обладает научной новизной благодаря комплексному рассмотрению совокупного влияния морфологии порошка, параметров высокоскоростного газопламенного напыления (HVOF), термической обработки и механизмов деградации на прочностные характеристики покрытий на основе $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{--NiCr}$. Впервые проанализированы как экспериментальные, так и теоретические исследования (например, [39–40]), с акцентом на различия фазового состава и функциональных свойств в зависимости от технологических режимов и состава исходного порошка. Особое внимание уделено стойкости покрытий к циклическим и термомеханическим нагрузкам, что критично для надёжной работы компонентов в авиационной и энергетической отраслях [41–42].

Таким образом, современные исследования в области инженерии поверхности (см. обзоры [43–44]) направлены на создание износ- и коррозионностойких покрытий, способных эффективно защищать материалы в условиях высоких температур и агрессивных сред, характерных для авиации, энергетики и ядерной промышленности. Металлокерамические и композиционные покрытия, в частности $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{--NiCr}$, демонстрируют высокую устойчивость к окислению, проникновению водорода и абразивному износу [45]. Технологии термического напыления, включая HVOF, позволяют получать покрытия с высокой плотностью, низкой пористостью и прочной адгезией, что способствует увеличению срока службы и надёжности конструктивных элементов [46].

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВОГО СОСТАВА И МИКРОСТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ПОКРЫТИЙ $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{--NiCr}$

Фазовый состав и микроструктура покрытий $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{--NiCr}$, формируемых методами HVOF и HVAF (High Velocity Air-Fuel), имеют решающее значение для их эксплуатационных характеристик, особенно в условиях высокотемпературного воздействия. Параметры синтеза – такие как температура пламени, скорость охлаждения, состав газов, расход кислорода и состав порошка – определяют не только фазовый состав, но и морфологию покрытий, что напрямую влияет на их твёрдость, износостойкость и эрозионную устойчивость [47].

При температурах 700–850 °C происходят выраженные микроструктурные изменения: рост и коалесценция карбидных частиц (Cr_3C_2), релаксация

остаточных напряжений, а также рекристаллизация связующей фазы NiCr. Эти процессы могут иметь как положительное, так и отрицательное влияние на эрозионную стойкость покрытий – в зависимости от продолжительности термического воздействия и начальной структуры, определяемой технологией нанесения.

Так, в работе B.Q. Wang и соавт. [48] было показано, что при температуре 300 °C HVOF-покрытие проявляло меньшую скорость эрозии по сравнению с комнатной температурой, что связано с повышением пластичности NiCr-связки. В то же время S. Matthews и др. [49] установили, что при 800 °C стойкость к эрозии также возрастает, что объясняется лучшим перераспределением напряжений в более пластичной связке. Однако, при длительном нагреве наблюдается деградация: процессы огрубления карбидной фазы (по механизму Оствальдовского созревания) уменьшают пластичность NiCr, что приводит к снижению способности материала рассеивать энергию удара. Это подтверждается результатами Matthews [49], где длительная термообработка при 900 °C в течение 2 и 30 суток снижала эрозионную стойкость по сравнению с первоначальной.

Фазовый анализ, представленный в таблице 2, демонстрирует важность выбора технологии напыления и её параметров. В данной таблице 2. представлены результаты анализа XRD для сравнения различных методов напыления и состава покрытий, их фазы, а также структура, что может быть важным для выбора оптимальной технологии в зависимости от требуемых эксплуатационных характеристик.

Фазовый анализ, представленный в таблице 2, демонстрирует важность выбора технологии напыления и её параметров. В данной таблице 2. представлены результаты анализа XRD для сравнения различных методов напыления и состава покрытий, их фазы, а также структура, что может быть важным для выбора оптимальной технологии в зависимости от требуемых эксплуатационных характеристик.

Анализ фазового состава покрытий $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{--NiCr}$, полученных методом высокоскоростного газопламенного напыления (HVOF), демонстрирует, что основными фазами, сохраняющимися в покрытии после напыления, являются Cr_3C_2 и связующая фаза NiCr. Xie M. и соавт. [49] показали, что спектры рентгеновской дифракции (XRD) покрытия $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{--NiCr}$ практически идентичны спектрам исходного порошка, что свидетельствует о сохранении кристаллической структуры материала при напылении. Кроме того, в покрытии был обнаружен слабый дифракционный пик Cr_7C_3 , который исследователи объясняют частичным обезуглероживанием Cr_3C_2 в условиях высокотемпературного пламени. Образование фазы Cr_7C_3 , обладающей высокой твёрдостью и температурой плавления, дополнительно способствует износостойкости покрытия [59–60].

**ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ФАЗОВЫЙ СОСТАВ ПОКРЫТИЙ $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$,
ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ HVOF: ОБЗОР**

Таблица 2. Сравнение анализа XRD покрытий полученных разными методами нанесения

№	Метод	Состав покрытия	Фазы	Структура	Период решетки, Å	Ссылки
1	HVOF	$\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$	Cr_3C_2 , Cr_7C_3 , NiCr	—	—	[50]
2	HVOF	$\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ (7102)	Cr_{23}C_6 , Cr_7C_3 , Cr_3C_2 , Cr, Ni	—	—	[51]
		$\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ (7305)	Cr_{23}C_6 , Cr_7C_3 , Cr_3C_2 , Cr, Ni			
3	HVOF	$\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-25NiCr}$	Cr_3C_2 , Cr_3Ni_2 , Cr	—	—	[52]
4	HVOF	$\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-25NiCr}$	Cr_3C_2 , Cr_2O_3 , $\gamma\text{-Ni}$	f.c.c.	—	[53]
	HVAF		Cr_3C_2 , Cr_2O_3 , Cr_7C_3 , $\gamma\text{-Ni}$			
5	HVOF	$\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$	Cr_3C_2 , Cr_7C_3 , NiCr	—	—	[54]
		$\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-WC-NiCoCrMo}$	WC, Cr_3C_2 , Cr_7C_3 , Ni _{ss} аморфный			
6	HVAF	$\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$	Cr_3C_2 , Cr_7C_3 , Ni, Cr	—	—	[55]
7	HVOF	$\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$	Cr_3C_2 , NiCr, Cr_7C_3 , Cr_{23}C_6 , Ni, Cr	—	—	[56]
8	HVOF	86WC–10Co–4Cr	(A1) WC	—	a = 2,9005 c = 2,8330	[57]
			W_2C		a = 2,9614 c = 4,6884	
			CoO		a = 4,2507	
			(A2) WC		a = 2,9011 c = 2,8328	
			W_2C		a = 2,9554 c = 4,6641	
			CoO		a = 4,2451	
			(A3) WC		a = 2,9027 c = 2,8345	
			W_2C		a = 2,9624 c = 4,6924	
			CoO		a = 4,2506	
9	HVOF	$\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$	Cr_{23}C_6	кубическая решётка, Fm-3m	a = 10,6600	[58]
			Cr_3C_2	орторомбическая, Pnma	a = 5,5400 b = 2,8330 c = 11,4940	
			CrNi_3	кубическая, Fm-3m	a = 3,5400	
			NiCrO_4	тетрагональная решетка (пространственная группа I41/amd)	a = 5,5380 b = 5,5380 c = 8,4350	
10	Supersonic atmospheric plasma spraying technology (SAPS)	$\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$	Cr_3C_2 , Cr_{23}C_6 , NiCr, $(\text{Ni,Cr})_7\text{C}_3$ и Ni	—	—	[59]

Zhou Z. и др. [54] представили дифрактограммы покрытий до начала коррозионных испытаний. Ими был выявлен сложный фазовый состав: Cr_3C_2 , NiCr, Cr_7C_3 , Cr_{23}C_6 , Ni и Cr. Это подтверждает возможность разложения исходных фаз и образования новых соединений в условиях высокотемпературного напыления и окислительной атмосферы [61–62].

Рентгенофазовый анализ, проведённый Rakhadilov B. и др. [56] на покрытиях, полученных из WC-Co порошков, показал наличие фаз WC, W_2C и CoO. Авторы установили, что фазы W_2C и CoO формируются при взаимодействии WC с кислородом и сопровождаются потерей углерода. Изменения скорости подачи кислорода приводят к варьированию интенсивности дифракционных пиков: в частности, усиление пиков W_2C наблюдалось при увеличении потока кислорода до 170 л/мин. Эти данные демонстрируют, что параметр подачи кислорода критически влияет на структурное состояние покрытия.

В работе Kurbanbekov S. и соавт. [57] покрытия $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$, напылённые методом HVOF на сплав Э110, исследовались методами XRD и СЭМ. Основными фазами были идентифицированы Cr_{23}C_6 (кубическая структура, Fm-3m), Cr_3C_2 (орторомбическая, Pnma) и CrNi_3 (кубическая, Fm-3m). При этом фаза NiCrO_4 , как продукт окисления, в исходных порошках отсутствовала. Эти результаты подчёркивают значимость фазового контроля для повышения как механических, так и коррозионных характеристик покрытий.

Метод HVAF, по сравнению с HVOF, обеспечивает более щадящие термические условия: температура пламени ниже, а окислительная активность среды – слабее. Это способствует лучшему сохранению исходной кристаллической структуры порошков и предотвращает избыточное окисление. Такие покрытия характеризуются меньшим содержанием вторичных фаз и равномерной микроструктурой, что

улучшает как износостойкость, так и устойчивость к термическому старению.

Таким образом, фазовый состав покрытий Cr₃C₂-NiCr напрямую зависит от условий синтеза, в частности – от температуры пламени, скорости охлаждения, состава порошка и расхода кислорода. Высокие температуры способствуют частичной декарбидизации Cr₃C₂ с образованием фаз Cr₇C₃ и Cr₂₃C₆, что, с одной стороны, повышает твёрдость, а с другой – снижает пластичность связующего. Более высокая скорость охлаждения при напылении HVOF способствует образованию аморфных или нанокристаллических фаз, увеличивающих микротвёрдость, но снижающих вязкость разрушения. В отличие от HVOF, метод HVAF обеспечивает более мягкие термические условия и, как правило, лучше сохраняет исходную кристаллическую структуру порошка, что положительно сказывается на износостойкости.

Также установлено, что длительное воздействие высоких температур приводит к огрублению карбидной фазы (например, по механизму созревания Оствальда), что ограничивает пластичность связующего и негативно влияет на эрозионную стойкость. Таким образом, оптимизация параметров напыления –

таких как скорость подачи порошка, температура пламени и расход окислителя – играет ключевую роль в достижении баланса между твёрдостью, прочностью сцепления и коррозионной стойкостью покрытий Cr₃C₂-NiCr [63].

Трибологические характеристики покрытий Cr₃C₂-NiCr

Исследования показали, что HVOF-покрытие Cr₃C₂-NiCr на сером чугуна значительно повышает его износостойкость. При содержании 80% Cr₃C₂ и 20% NiCr твердость покрытия составила 1410 HV, что в 3,5 раза превышает твердость исходного материала (410 HV). Покрытие с 75% Cr₃C₂ и 25% NiCr также продемонстрировало высокую твердость (1350 HV). Испытания методом «штифт-на-диске» показали снижение коэффициента трения и скорости износа по сравнению с непокрытым чугуном, причём состав с 80% Cr₃C₂ оказался более эффективным за счёт высокого содержания карбидов [64].

В таблице 3 приведён сравнительный анализ коэффициента трения (CoF) покрытий при различных температурах и нагрузках, в зависимости от метода нанесения.

Таблица 3. Сравнительный анализ коэффициента трения покрытий в зависимости от температуры

№	Метод	Состав покрытия	Нагрузка (N)	Коэффициент трения (f)/T, °C	Ссылки
1	HVOF	80%Cr ₃ C ₂ +20%NiCr	10	0,2018	[65]
			20	0,2155	
			30	0,2346	
		75%Cr ₃ C ₂ +25%NiCr	10	0,2161	
			20	0,2341	
			30	0,2516	
2	APS (воздушно-плазменное напыление)	Cr ₃ C ₂ -NiCr	25	0,63 (RT)	[66]
				0,37 (400 °C)	
				0,43 (800 °C)	
			50	0,51 (RT)	
				0,36 (400 °C)	
				0,41 (800 °C)	
3	HVOF	CrN	316	0,6 (25 °C)	[67]
				0,6-0,2 (150 °C)	
				0,4 (350 °C)	
				0,3 (550 °C)	
		CrN/Cr ₃ C ₂ -NiCr	316	0,6 (25 °C)	
				0,3 (150 °C)	
				0,4 (350 °C)	
				0,3 (550 °C)	
4	HVOF	86WC-10Co-4Cr	-	0,488-0,463	[68]
5	APS	NiCr/(Cr ₃ C ₂ -BaF ₂ -CaF ₂)	-	0,8-0,25 (0-800 °C)	[69]
6	APS	Cr ₃ C ₂ -NiCr	25	0,59 (RT)	[70]
				0,39 (400 °C)	
				0,42 (400 °C)	
			50	0,58 (RT)	
				0,34 (400 °C)	
				0,38 (400 °C)	

В работах по анализу зависимости коэффициента трения (CoF) и объема износа от расстояния ак. Rakhadilov B. и соавт. установили, что при увеличении расстояния напыления от 100 до 300 мм коэффициент трения снижается с 0,488 до 0,463, а объем износа уменьшается с $0,079 \text{ мм}^3$ до $0,036 \text{ мм}^3$. Наилучшая износостойкость наблюдается при расстоянии 300 мм, а снижение износостойкости при меньшем расстоянии связано с уменьшением содержания WC-фазы [67].

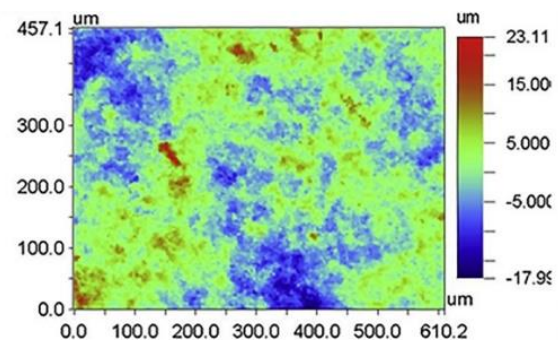
Для стали H11 при комнатной температуре значения CoF составили примерно 0,48 и 0,40 при нагрузках 25 и 50 Н соответственно. Покрытие $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ увеличивало эти значения до $\sim 0,63$ и $\sim 0,51$, однако обеспечивало значительное снижение удельной скорости износа: с $609,91 \pm 13$ и $487,18 \pm 10 \text{ мм}^3/\text{Нм} \cdot 10^{-6}$ (без покрытия) до $5,52 \pm 0,11$ и $9,82 \pm 0,19 \text{ мм}^3/\text{Нм} \cdot 10^{-6}$ соответственно. Это снижение объясняется высокой твердостью и прочностью сцепления покрытия [68].

Сравнение порошков 75% $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-}25\%\text{NiCr}$, произведенных разными способами, выявило значительные различия в морфологии и фазовом составе. Покрытия из порошка Woka 7302 имели более плотную микроструктуру, меньшее обезуглероживание, более низкое содержание оксидов и лучшую прочность по сравнению с Praxair 1375. Изменение соотношения O_2/H_2 в горелке HVOF оказывало значительное влияние на модуль Юнга и прочность покрытия, но практически не изменяло твердость по Виккерсу [69].

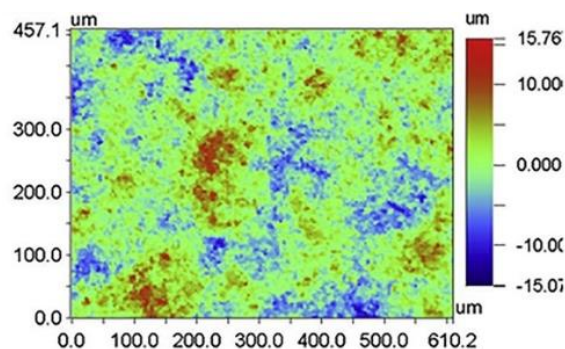
S. Mahade и др. оценивали возможность использования $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ как экологически безопасной альтернативы токсичным покрытиям WC-Co для тормозных дисков. Покрытия наносились методами HVOF и HVOF и оценивались по микроструктуре, фазовому составу, механическим характеристикам и пористости. Износ при скольжении оценивался при нагрузках 5, 10 и 15 Н с использованием оксидно-алюминиевого шарика. Результаты показали, что HVOF-покрытия обеспечивают лучшую стойкость при высоких нагрузках, а HVOF – при более мягких условиях эксплуатации [71].

Шероховатость поверхности нанесенных покрытий была измерена с помощью оптического профилировщика, а двумерные изображения шероховатости поверхности показаны на рисунке 1. Как показано на рисунке 1, для покрытий, нанесенных методом HVOF, была измерена немного более высокая шероховатость поверхности (S_a , $\mu\text{м}$).

В работе Bobzin K. и др. $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ покрытие, полученное методом HVOF, подвергалось циклической ударной нагрузке (от 300 до 1000 Н, до 10^6 циклов) для оценки его стойкости. При 300–800 Н происходило когезионное разрушение покрытия, тогда как при 1000 Н разрушения затрагивали также границу между покрытием и подложкой. Локальная пластическая деформация и микроработы приводили к постепенному увеличению объема кратера, а разрушение покрытия вызывало его отслоение при высоких нагрузках [72].



а) $S_a = 3,5 \pm 0,1 \mu\text{м}$



б) $S_a = 3 \pm 0,2 \mu\text{м}$

Рисунок 1. Двумерное изображение шероховатости поверхности покрытия $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$, нанесенного методом HVOF (а) и HVOF (б) [71]

Агломерированный порошок 75 $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-}25\%\text{NiCr}$, нанесенный методом HVOF на подложку из стали 304, после термообработки (700–800 °С, до 16 суток) показал формирование карбидов Cr_7C_3 и Cr_{23}C_6 , устраняющих аморфные фазы. Это способствовало росту твердости покрытия. Окисление следовало параболическому закону при активационной энергии 164 кДж/моль. Также наблюдалась взаимодиффузия компонентов покрытия и подложки, особенно углерода, что подтверждалось изменением микротвердости вдоль интерфейса [73].

Разнообразие результатов, полученных при исследовании $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ покрытий, обусловлено множеством факторов, включая состав порошка, технологию напыления, условия термообработки и параметры испытаний. Покрытия с содержанием 80% Cr_3C_2 и 20% NiCr обеспечивают наивысшую твердость (1410 HV) и минимальный коэффициент трения. Морфология и фазовый состав порошка, а также выбор метода нанесения (HVOF или HVOF) критично влияют на конечные свойства покрытия. HVOF обеспечивает лучшую стойкость к износу при высоких нагрузках, тогда как HVOF эффективнее в мягких условиях. Изменение отношения O_2/H_2 и расстояния напыления позволяет целенаправленно регулировать механические свойства. Следовательно, для достижения оптимальных характеристик покрытия необходимо учитывать условия эксплуатации, а также параметры порошка и процесса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты анализа подтвердили, что параметры процесса HVOF-напыления оказывают решающее влияние на структуру, фазовый состав и эксплуатационные свойства покрытий $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{--NiCr}$. Повышение содержания карбидной фазы (до 80% Cr_3C_2) позволяет значительно увеличить микротвёрдость покрытия (до 1410 HV), снизить коэффициент трения и удельную скорость износа, что особенно важно для условий интенсивного механического и температурного воздействия. Такие покрытия показали улучшенные характеристики по сравнению с непокрытым материалом и покрытиями с меньшей долей карбидов.

Оптимизация технологических параметров – таких как расстояние напыления, соотношение O_2/H_2 , температура и давление – позволяет контролировать плотность, пористость и адгезию покрытия к подложке, минимизируя дефекты и обезуглероживание. Установлено, что с увеличением расстояния напыления улучшается износостойкость и снижается коэффициент трения, а изменение параметров горелки увеличивает модуль упругости покрытия почти в два раза без значительного влияния на твёрдость.

Термическая обработка напылённых покрытий дополнительно повышает их прочность за счёт образования карбидных фаз Cr_7C_3 и Cr_{23}C_6 , что также способствует устранению аморфных фаз и увеличивает термическую стабильность. Однако при нагрузках выше 1000 Н наблюдаются когезионные разрушения и отслоения покрытия, указывающие на необходимость дальнейшей оптимизации фазовых границ и термостойкости при экстремальных нагрузках.

Абразивный износ покрытий происходит равномерно, вовлекая как карбидные, так и металлические фазы. Несмотря на общую стойкость, выявлены зоны локального растрескивания и вырывания карбидов, что снижает долговечность при воздействии агрессивных абразивов.

Сравнительный анализ технологий HVOF и HVAF показал, что HVAF-покрытия обладают лучшей износостойкостью при высоких нагрузках, в то время как HVOF-покрытия эффективны при умеренных условиях эксплуатации. Выбор порошка также играет ключевую роль: покрытия из Woka 7302 превосходят аналоги по плотности, прочности и низкой склонности к обезуглероживанию по сравнению с порошками Praxair.

Таким образом, покрытия $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{--NiCr}$, полученные методом HVOF, являются высокоэффективными для применения в машиностроении, авиации, энергетике и других отраслях, где необходимы высокая износостойкость, сопротивление окислению и термическая стабильность. Перспективными направлениями дальнейших исследований являются разработка многофазных композиционных покрытий, изучение поведения при циклических и комбинированных нагрузках, а также точная настройка параметров

напыления и последующей обработки для достижения наилучших эксплуатационных характеристик.

Благодарности

Данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP19579179).

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Chong K., Zou Y., Wu D., Tang Y., Zhang Y. Pulsed laser re-melting supersonic plasma sprayed $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{--NiCr}$ coatings for regulating microstructure, hardness, and corrosion properties // Surface and Coatings Technology. – 2021. – Vol. 418. – P. 127258. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127258>.
2. Ping X.L., Fu H.G., Sun S.T., Lin J., Guo X.Y., Lei Y.P. Microstructure and performance of Nb-bearing Ni60A– Cr_3C_2 coatings manufactured by laser cladding // Surface Engineering. – 2020. – Vol. 36, No. 12. – P. 1294–1306. <https://doi.org/10.1080/02670844.2019.1631510>.
3. Sadeghimeresht E., Markocsan N., Nylen P. Microstructural characteristics and corrosion behavior of HVOF- and HVOF-sprayed Fe-based coatings // Surface and Coatings Technology. – 2017. – Т. 318. – P. 365–373. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.11.088>.
4. Thakare, J. G., Pandey, C., Mulik, R. S., & Mahapatra, M. M. Microstructure and mechanical properties of D-Gun sprayed $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{--NiCr}$ coating on P91 steel subjected to long term thermal exposure at 650 °C // Materials Research Express,. – 2019. – Vol. 6(11). – 1165h1. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab5265>
5. Du, H., Sun, C., Hua, W., & Zhang, G. Fabrication and evaluation of D-gun sprayed WC–Co coating with self-lubricating property // Tribology Letters. – 2006. – Vol. 23. – P. 261–266. <https://doi.org/10.1007/s11249-006-9119-3>
6. Assadi, H., Gärtner, F., Stoltenhoff, T., & Kreye, H. Bonding mechanisms in cold gas spraying // Acta Materialia. – 2003. – Vol. 51(15). – P. 4379–4394. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(03\)00274-X](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(03)00274-X)
7. Геращенко Д.А. Применение технологии холодного газодинамического напыления как аддитивного способа для получения материалов на основе алюминидов никеля и алюминидов титана // Вопросы материаловедения. – 2021. – № 3(107). – С. 118–127. <https://doi.org/10.22349/1994-6716-2021-107-3-118-127>
8. Li, S., Duan, Y., Gong, S., & Li, Q. Microstructure and deposition mechanism of laser-hybrid plasma spraying NiCr– Cr_3C_2 coating // Rare Metal Materials and Engineering. – 2013. – Vol. 42. – P. 106–109.
9. Espallargas, N. Future Development of Thermal Spray Coatings: Types, Designs, and Applications. Elsevier. – 2015.
10. He, J., & Lavernia, E. J. (2001). Precipitation phenomenon in nanostructured $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{--NiCr}$ coatings // Materials Science and Engineering: A. – 2001. – Vol. 301(1). – P. 69–79.
11. Guilemany, J. M., Miguel, J. M., Vizcaíno, S., Lorenzana, C., Delgado, J., & Sánchez, J. Role of heat treatments in the improvement of the sliding wear properties of $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{--NiCr}$ coatings // Surface and Coatings Technology. – 2002. – Vol. 157(2). – P. 207–213. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(02\)00148-2](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(02)00148-2)

12. Chakradhar, R. P. S., Prasad, G., Venkateswarlu, K., & Rao, D. S. An investigation on the wear and corrosion behavior of HVOF-sprayed $\text{WC-12Co-Al}_2\text{O}_3$ cermet coating // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2018. – Vol. 27. – P. 1241–1248. <https://doi.org/10.1007/s11665-018-3240-y>
13. Scendo, M. Effect of the composition and the thermal treatment on corrosion resistance of $\text{WC-Co-Al}_2\text{O}_3$ ceramic coatings // *International Journal of Electrochemical Science*. – 2018. – Vol. 13(9). – P. 8745–8765. <https://doi.org/10.20964/2018.09.22>
14. Mouche, P. A., Ang, C., Koyanagi, T., Doyle, P., & Katoh, Y. Characterization of PVD Cr, CrN, and TiN coatings on SiC // *Journal of Nuclear Materials*. – 2019. – Vol. 526. – P. 151781. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2019.151781>
15. Gao, J., Yu, J., Lu, S., & Liang, J. Synthesis of functional ceramic nanocrystals (SiC, TiC, TiN) by arc-discharge plasma process // 2017 IEEE 17th International Conference on Nanotechnology (IEEE-NANO) (pp.). IEEE. <https://doi.org/10.1109/NANO.2017.8117328>
16. Nguyen, T. V., Nguyen, T. A., Ha, P. T., & Pham, L. T. Sealing treatment of plasma-sprayed $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr/Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ coating by aluminum phosphate sealant containing Al_2O_3 nanoparticles // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2021. <https://doi.org/10.1007/s11666-021-01263-2>
17. Reardon, J. D., Mignogna, R., & Longo, F. N. (1981). Plasma- and vacuum-plasma-sprayed Cr_3C_2 composite coatings // *Thin Solid Films*. – 1981. – Vol. 83(3). – P. 345–351. [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(81\)90637-4](https://doi.org/10.1016/0040-6090(81)90637-4)
18. Houck, D. L., & Cheney, R. F. (1984). Comparison of properties of $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ coatings thermally sprayed from pre-alloyed and mechanically mixed powders // *Thin Solid Films*. – 1984. – Vol. 118(4). – P. 507–513. [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(84\)90279-7](https://doi.org/10.1016/0040-6090(84)90279-7)
19. Ulianitsky, VY; Batraev, IS; Rybin, D. K.; et al. Detonation Spraying of $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ Coatings and Their Properties // *J. Therm. Spray Technol.* – 2022. – Vol. 31. – P. 598–608. <https://doi.org/10.1007/s11666-021-01301-z>
20. Lih, W. C.; Yang, S.H.; Su, C.Y.; Huang, S.C.; Hsu, I. C.; Leu, MS Effects of Process Parameters on Molten Particle Speed and Surface Temperature and the Properties of HVOF CrC–NiCr Coatings // *Surf. Coat. Technol.* – 2000, – Vol. 133-134(1). – P. 54–60. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(00\)00873-2](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(00)00873-2)
21. Matikainen, V.; Bolelli, G.; Koivuluoto, H.; Honkanen, M.; Vippola, M.; Lusvarghi, L.; Vuoristo, P. A Study of Cr_3C_2 -Based HVOF-and HVOF-Sprayed Coatings: Microstructure and Carbide Retention // *J. Therm. Spray Technol.* – 2017. – Vol. 26(6). – P. 1239–1256. <https://doi.org/10.1007/s11666-017-0578-x>
22. Zheng, J.-C., Hu, X., & Ren, Z. Solid-state reaction studies in $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ system by diffusion couple method // *ISIJ International*. – 2017. – Vol. 57(10). – P. 1762–1766. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2017-042>
23. Guo, C., Zhou, J., Chen, J., & Zhao, J. High temperature wear resistance of laser cladding NiCrBSi and NiCrBSi/ WC-Ni composite coatings // *Wear*. – 2011. – Vol. 270 (7–8). – P. 492–498. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2011.01.003>
24. Mendoza-Serna, R., Méndez-Vivar, J., Loyo-Arnaud, E., & Martínez-Fuentes, S. S. Sintering of $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ and $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ obtained by the sol-gel process // *Key Engineering Materials*. – 2004. – Vol. 264–268. – P. 355–358. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.264-268.355>
25. Hornik, J., Krum, S., Tondl, D., & Puchnin, M. Multilayer coatings Ti/TiN, Cr/CrN and W/WN deposited by magnetron sputtering for improvement of adhesion to base materials // *Acta Polytechnica*. – 2015. – Vol. 55(6). – P. 388–392. <https://doi.org/10.14311/AP.2015.55.0388>
26. He, B., Zhang, L., Yun, X., Wang, J., Zhou, G., Chen, Z., & Yuan, X. Comparative study of HVOF $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ coating with different bonding layer on the interactive behavior of fatigue and corrosion // *Coatings*. – 2022. – Vol. 12(3). – P. 307. <https://doi.org/10.3390/coatings12030307>
27. Hebbale, A. M., Kumar, M., Soudagar, M. E. M., Ahamad, T., Kalam, M. A., Mubarak, N. M., & Khalid, M. A comparative study on characteristics of composite ($\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$) clad developed through diode laser and microwave energy // *Scientific Reports*. – 2023. – Vol. 13(1). – P. 10778. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-37991-4>
28. Liu, X., Shen, C., Hu, K., Wang, H., Li, Y., & He, J. Improvement in high-velocity air-fuel-sprayed $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr/(NiAl, NiCr)}$ composite coatings by annealing heat treatment // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2023. – Vol. 32. – P. 199–210. <https://doi.org/10.1007/s11665-022-06938-7>
29. Zhang Y., Wang J., Li S. High-temperature oxidation of zirconium alloys: Mechanisms and protective strategies // *Corrosion Science*. – 2019. – Vol. 157. – P. 103185. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.103185>
30. Sidhu T.S., Prakash S., Agrawal R.D. State of the art of HVOF coating investigations – A review // *Marine Technology Society Journal*. – 2005. – Vol. 39, No. 2. – P. 53–64. <https://doi.org/10.4031/002533205787443908>
31. Lee S., Choi J., Kim T. Development of metal-ceramic composite coatings for zirconium alloys in nuclear reactors // *Surface and Coatings Technology*. – 2020. – Vol. 402. – P. 126647. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126647>
32. Kim Y., Park H. Advances in protective coating technology for zirconium alloys used in nuclear applications // *Journal of Nuclear Materials*. – 2018. – Vol. 508. – P. 7–15. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2018.05.033>
33. Bossis P., Pecheur D., Hanifi K., Thomazet J., Blat M. Comparison of the high burn-up corrosion on M5 and low tin Zircaloy-4 // *Proceedings of the 14th International Symposium on Zirconium in the Nuclear Industry*. – 2006. – Vol. 3. – P. 494–525. <https://doi.org/10.1520/JAI12404>
34. Kim J.H., Choi B.K., Baek J.H., Jeong Y.H. Effects of oxide and hydrogen on the behavior of Zircaloy-4 cladding during the loss of the coolant accident (LOCA) // *Nuclear Engineering and Design*. – 2006. – Vol. 236, No. 22. – P. 2386–2393. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2006.02.012>
35. Zieliński A., Sobieszczyk S. Hydrogen enhanced degradation and oxide effects in zirconium alloys for nuclear applications // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2011. – Vol. 36. – P. 8619–8629. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.04.002>
36. Charit I. Accident tolerant nuclear fuels and cladding materials // *JOM*. – 2018. – Vol. 70. – P. 173–175. <https://doi.org/10.1007/s11837-017-2701-3>
37. Motta A.T., Capolungo L., Chen L.Q., Cinbiz M.N., Daymond M.R., Koss D.A., Lacroix E., Pastore G., Simon P.-C.A., Tonks M.R., et al. Hydrogen in zirconium alloys:

- A review // *Journal of Nuclear Materials*. – 2019. – Vol. 518. – P. 440–460.
<https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2019.02.042>
38. Duan Z., Yang H., Satoh Y., Murakami K., Kano S., Zhao Z., Shen J., Abe H. Current status of materials development of nuclear fuel cladding tubes for light water reactors // *Nuclear Engineering and Design*. – 2017. – Vol. 316. – P. 131–150.
<https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2017.02.031>
 39. Motta A.T., Chen L.Q. Hydrogen embrittlement and high-temperature oxidation of zirconium alloys in nuclear reactors // *Progress in Materials Science*. – 2015. – Vol. 77. – P. 411–461.
<https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2015.04.002>
 40. eitov, B., Kurbanbekov, S., Baltabayeva, D., Kakimzhanov, D., Katpayeva, K., Temirbekov, A., Bekbayev, S., & Mussakhan, N. Review of Physical and Mechanical Properties, Morphology, and Phase Structure in $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ Composite Coatings Sprayed by HVOF Method // *Coatings*. – 2025. – Vol. 15(4). – P. 479.
<https://doi.org/10.3390/coatings15040479>
 41. Fotovvati, B., Namdari, N., & Dehghanghadikolaei, A. On Coating Techniques for Surface Protection: A Review // *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. – 2019. – Vol. 3(1). – P. 28.
<https://doi.org/10.3390/jmmp3010028>
 42. Vashishtha, N.; Khatirkar, S. G.; Sapate, RK Tribological behavior of HVOF sprayed WC-12Co, WC-10Co-4Cr and $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-25NiCr}$ coatings // *Tribol. Int.* – 2017. – Vol. 105. – P. 55–68. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2016.09.025>
 43. Lauzuardy, J.; Basuki, E. A.; Martides, E.; Septianissa, S.; Prawara, B.; Junianto, E.; Riyanto, E. Microstructure Characteristics of $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ Coatings Deposited with the High-Velocity Oxy-Fuel Thermal-Spray Technique // *Mater. Technol.* – 2024. – Vol. 58(2). – P. 137–145.
<https://doi.org/10.17222/mit.2023.869>
 44. Zhu L., Wang S., Pan H., Yuan C., Chen X. Research on remanufacturing strategy for 45 steel gear using H13 steel powder based on laser cladding technology // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2020. – Vol. 49. – P. 344–354. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.12.009>
 45. Janka L. Thermally sprayed $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ coatings: improving the abrasion resistance. – 2018.
 46. Chen T., Xu L., Liu X. Hydrogen-induced embrittlement and degradation of zirconium alloys in nuclear reactors: A review // *Journal of Nuclear Materials*. – 2021. – Vol. 543. – P. 152536.
<https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2021.152536>
 47. Wang, B.Q., Luer, L. High Erosion Temperature of $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ Thermal Spray Coatings – The Role of Phase Microstructure // *Wear*. – 1994. – Vol. 174, No. 1–2. – P. 177–185. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(94\)90100-7](https://doi.org/10.1016/0043-1648(94)90100-7)
 48. Matthews, S., James, B., Hyland, M. High Erosion Temperature of $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ Thermal Spray Coatings – The Role of Phase Microstructure // *Surface and Coatings Technology*. – 2009. – Vol. 203, No. 9. – P. 1144–1153.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2008.10.008>
 49. Xie, M., Lin, Y., Ke, P., Wang, S., Zhang, S., Zhen, Z., Ge, L. Influence of Process Parameters on High Velocity Oxy-Fuel Sprayed $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-25NiCr}$ Coatings // *Coatings*. – 2017. – Vol. 7, No. 7. – P. 98.
<https://doi.org/10.3390/coatings7070098>
 50. Poirier, D., Legoux, J. G., Lima, R.S. Engineering HVOF-Sprayed $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ Coatings: The Effect of Particle Morphology and Spraying Parameters on the Microstructure, Properties, and High Temperature Wear Performance // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2013. – Vol. 22. – P. 280–289. <https://doi.org/10.1007/s11666-012-9833-3>
 51. Sahraoui, T., Fenineche, N.E., Montavon, G., Coddet, C. Structure and Wear Behavior of HVOF Sprayed $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ and WC-Co Coatings // *Materials & Design*. – 2003. – Vol. 24, No. 5. – P. 309–313.
[https://doi.org/10.1016/S0261-3069\(03\)00059-1](https://doi.org/10.1016/S0261-3069(03)00059-1)
 52. Bolelli, G., Berger, L.M., Börner, T., Koivuluoto, H., Matikainen, V., Lusvarghi, L., Lyphout, C., Markocsan, N., Nylén, P., Sassatelli, P., Trache, R., Vuoristo, P. Sliding and Abrasive Wear Behavior of HVOF- and HVOF-Sprayed $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ Hardmetal Coatings // *Wear* – 2016. – Vol. 358–359. – P. 32–50.
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.03.034>
 53. Zhou, W., Zhou, K., Li, Y., Deng, C., Zeng, K. High Temperature Wear Performance of HVOF-Sprayed $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-WC-NiCoCrMo}$ and $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ Hardmetal Coatings // *Applied Surface Science*. – 2017. – Vol. 416. – P. 33–44.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.04.132>
 54. Zhou, Z., Duan, D., Li, S., Sun, D., Yong, J., Jiang, Y., He, W., Xu, J. Microstructure and High-Temperature Properties of $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ Nanoceramic Coatings Prepared by HVOF // *Coatings*. – 2023. – Vol. 13, No. 10. – P. 1741.
<https://doi.org/10.3390/coatings13101741>
 55. Selvam Kevin, P., Tiwari, A., Seman, S., Beer Mohamed, S.A., Jayaganthan, R. Erosion-Corrosion Protection Due to $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ Cermet Coating on Stainless Steel // *Coatings*. – 2020. – Vol. 10, No. 11. – P. 1042.
<https://doi.org/10.3390/coatings10111042>
 56. Rakhadilov B., Muktanova N., Seitkhanova A., Kakimzhanov D., Dautbekov M. Investigation of the Influence of the Oxygen Flow Rate on the Mechanical, Structural and Operational Properties of 86WC-10Co-4Cr Coatings, as Determined Using the High-Velocity Oxyfuel Spraying Method // *Coatings*. – 2024. Vol. 14, No. 10. – P. 1275. <https://doi.org/10.3390/coatings14101275>
 57. Kurbanbekov S., Rakhadilov B., Kakimzhanov D., Seitov B., Katpaeva K., Kurmantayev A., Dautbekov M., Kengesbekov A. Research on the Structural-Phase and Physical-Mechanical Characteristics of the $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ Composite Coating Deposited by the HVOF Method on E110 Zirconium Alloy // *Coatings*. – 2024. – Vol. 14. – P. 1030. <https://doi.org/10.3390/coatings14081030>
 58. Zhang C., Ma H., Bao C. Corrosive Wear Mechanism of Supersonic Atmospheric Plasma Spray Coating of Hydraulic Supports in Industrial Environment // *J. Mater. Eng. Perform.* – 2025. – Vol. 34. – P. 520–530.
<https://doi.org/10.1007/s11665-023-09059-x>
 59. Lin L., Li G.L., Wang H.D., Kang J.J., Xu Z.L., Wang H.J. Structure and wear behavior of $\text{NiCr-Cr}_3\text{C}_2$ coatings sprayed by supersonic plasma spraying and high velocity oxy-fuel technologies // *Appl. Surf. Sci.* – 2015. – Vol. 356. – P. 383–390.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.08.019>
 60. Alroy R.J., Kamaraj M., Sivakumar G. Influence of processing condition and post-spray heat treatment on the tribological performance of high velocity air-fuel sprayed $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-25NiCr}$ coatings // *Surf. Coat. Technol.* – 2023. – Vol. 463. – P. 129498.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.129498>

61. Magnani M., Suegama P.H., Espallargas N., Fugivara C.S., Dosta S., Guilemany J.M., Benedetti A.V. Corrosion and Wear Studies of Cr₃C₂-NiCr -HVOF Coatings Sprayed on AA7050 T7 Under Cooling // J. Therm. Spray Technol. – 2009. – Vol. 18. – P. 353–363. <https://doi.org/10.1007/s11666-009-9305-6>
62. Du J.-Y., Li F.-Y., Li Y.-L., Wang L.-M., Lu H.-Y., Ran X.-J., Zhang X.-Y. Influences of plasma arc remelting on microstructure and service performance of Cr₃C₂-NiCr/NiCrAl composite coating // Surf. Coat. Technol. – 2019. – Vol. 369. – P. 16–30. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.04.037>
63. Jonda, E., Łatka, L., & Pakielna, W. Microstructure and selected properties of Cr₃C₂-NiCr coatings obtained by HVOF on magnesium alloy substrates // Materials. – 2020. – Vol. 13(12). – P. 2775. <https://doi.org/10.3390/ma13122775>
64. Shunmuga Priyan M., Azad A., Araffath S.Y. Influence of HVOF Parameters on the Wear Resistance of Cr₃C₂-NiCr Coating // J. Mater. Sci. Surf. Eng. – 2016. – Vol. 4. – No. 2. – P. 355–359.
65. Chhabra P., Kaur M. Wear and Friction Characteristics of Atmospheric Plasma Sprayed Cr₃C₂-NiCr Coatings // Tribol. Mater. Surf. Interfaces. – 2020. – Vol. 14, No. 3. – P. 177–192. <https://doi.org/10.1080/17515831.2020.1720383>
66. Li W., Tang P., Shang L., He D., Wang L., Zhang G., Jin K. Tribological Behaviors of CrN/Cr₃C₂-NiCr Duplex Coating at Elevated Temperatures // Surf. Coat. Technol. – 2019. – Vol. 378. – P. 124926. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.124926>
67. Rakhadilov B., Muktanova N., Kakimzhanov D., Adilkanova M., Kurbanbekov S., Abdulina S. Influence of Varying the Spraying Distance on the Structural-Phase State and Mechanotribological Properties of 86WC-10Co-4Cr-Based Coatings Obtained by the HVOF Method // Coatings. – 2024. – Vol. 14, No. 3. – P. 264. <https://doi.org/10.3390/coatings14030264>
68. Huang C., Du L., Zhang W. Friction and Wear Characteristics of Plasma-Sprayed Self-Lubrication Coating with Clad Powder at Elevated Temperatures up to 800 °C // J. Therm. Spray Technol. – 2014. – Vol. 23. – P. 463–479. <https://doi.org/10.1007/s11666-013-9996-6>
69. Chhabra P., Kaur M., Singh S. High Temperature Tribological Performance of Atmospheric Plasma Sprayed Cr₃C₂-NiCr Coating on H13 Tool Steel // Mater. Today: Proc. – 2020. – Vol. 33. – P. 1518–1530. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.536>
70. Prudenziati M., Gazzadi G.C., Medici M., et al. Cr₃C₂-NiCr HVOF-Sprayed Coatings: Microstructure and Properties Versus Powder Characteristics and Process Parameters // J. Therm. Spray Technol. – 2010. – Vol. 19. – P. 541–550. <https://doi.org/10.1007/s11666-009-9458-3>
71. Mahade S. Investigating Load-Dependent Wear Behavior and Degradation Mechanisms in Cr₃C₂-NiCr Coatings Deposited by HVAF and HVOF // J. Mater. Res. Technol. – 2021. – Vol. 15. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(00\)01383-6](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)01383-6)
72. Bobzin, K., Zhao, L., Oete, M., Königstein, T., & Steeger, M. Impact wear of an HVOF-sprayed Cr₃C₂-NiCr coating // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2017. – Vol. 70. – P. 281–287. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2017.10.011>
73. Ding, Y. Effects of elevated temperature exposure on the microstructural evolution of Ni(Cr)-Cr₃C₂ coated 304 stainless steel (Doctoral dissertation). University of Nottingham. – 2009.

HVOF ӘДІСІМЕН ТҮНДЫРЫЛҒАН $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ ЖАБЫНДАРЫНЫҢ ФИЗИКАЛЫҚ-МЕХАНИКАЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІ МЕН ФАЗАЛЫҚ ҚҰРАМЫНА ШОЛУ

Ш. Р. Курбанбеков^{1,2}, Д. Э. Балтабаева^{1,2*}, Б. Ж. Сейтов¹, Ю. О. Амангельдиева¹, А. Н. Әбдімүтәліп¹

¹ *Х.А. Ясауи атындағы халықаралық қазақ-түрік университеті, Түркістан, Қазақстан*

² *«Инновациялық технологиялар институты және жаңа материалдар» ЖШС, Түркістан, Қазақстан*

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

Бұл шолу мақаласында хром карбиді-никель-хром ($\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$) жабындарының микроқұрылымының қалыптасуына және өнімділік сипаттамаларына жоғары жылдамдықты оттегі-отынды бүрку (HVOF) параметрлерінің әсерін егжей-тегжейлі талдау қарастырылған. Сыртқы қарқынды жүктемелер кезінде жабынның механикалық әрекетін анықтайтын тығыздық, кеуектілік, жабысқақ беріктік және микроқаттылықты қамтитын негізгі құрылымдық параметрлер зерттеледі. Тозуға төзімділік механизміне, субстратқа адгезияның беріктігіне және қатты механикалық әсерлер жағдайында жұмыс істеу үшін өте маңызды шаршаудың бұзылуына төзімділікке ерекше назар аударылады. Өртүрлі HVOF бүрку режимдерінің жабындардың фазалық сипаттамаларына әсері, сондай-ақ олардың пайдалану сипаттамаларымен корреляциясы қарастырылады. Жүргізілген талдаулар негізінде $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ жабындарын авиацияда, энергетикада және машина жасау өнеркәсібінде қолданудың перспективалы бағыттары тұжырымдалған, олар жоғары тозуға төзімділік пен термиялық тұрақтылықты үйлестіруді талап етеді.

Түйін сөздер: HVOF әдісі, $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ жабыны, физикалық-механикалық қасиеттері, XRD, үйкеліс коэффициенті.

REVIEW OF THE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES AND PHASE COMPOSITION OF $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ COATINGS DEPOSITED BY THE HVOF METHOD

Sh. R. Kurbanbekov^{1,2}, D. E. Baltabaeva^{1,2*}, B. Zh. Seytov¹, Yu. O. Amangel'dieva¹, A. N. Abdimutalip¹

¹ *International Kazakh-Turkish University named after H.A. Yasawi, Turkestan, Kazakhstan*

² *“Institute of Innovative Technologies and New Materials” LLP, Turkestan, Kazakhstan*

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

This review provides a detailed analysis of the influence of high-velocity oxygen-fuel spraying (HVOF) parameters on the microstructure formation and performance characteristics of chromium carbide-nickel-chromium ($\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$) coatings. Key structural parameters, including density, porosity, adhesive strength, and microhardness, which determine the mechanical behavior of the coating under intense external loads, are investigated. Particular attention is paid to the mechanism of wear resistance, adhesion strength to the substrate, and resistance to fatigue failure, which is critical for operation under extreme mechanical stress. The effect of various HVOF spraying modes on the phase features of the coatings, as well as their correlation with performance characteristics, is considered. Based on the analysis, promising areas of application of $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ coatings in the aviation, energy and mechanical engineering industries are formulated, requiring a combination of high wear resistance and thermal stability.

Keywords: HVOF method, $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ coatings, physical and mechanical properties, XRD, coefficient of friction.