



## Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)











### Структура и свойства покрытий WC-10Co4Cr, полученных высокоскоростным плазменным напылением



Елена Корниенко<sup>1, a, \*</sup>, Игорь Гуляев<sup>2, b</sup>, Виктор Кузьмин<sup>2, c</sup>, Александр Тамбовцев<sup>2, d</sup>, Павел Тырышкин<sup>2, e</sup>

<sup>1</sup> Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073, Россия

<sup>2</sup> Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, ул. Институтская, 4/1, г. Новосибирск, 630090, Россия

<sup>a</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-5874-5422>,  [e.kornienko@corp.nstu.ru](mailto:e.kornienko@corp.nstu.ru), <sup>b</sup>  <https://orcid.org/0000-0001-5186-6793>,  [gulyaev@itam.nsc.ru](mailto:gulyaev@itam.nsc.ru),

<sup>c</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-9951-7821>,  [vikuzmin57@mail.ru](mailto:vikuzmin57@mail.ru), <sup>d</sup>  <http://orcid.org/0000-0003-1635-9352>,  [alsetam123@icloud.com](mailto:alsetam123@icloud.com),

<sup>e</sup>  <https://orcid.org/0009-0009-8125-6772>,  [pavel199730@gmail.com](mailto:pavel199730@gmail.com)

#### ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.793.71

#### История статьи:

Поступила: 24 марта 2023

Рецензирование: 02 апреля 2023

Принята к печати: 08 апреля 2023

Доступно онлайн: 15 июня 2023

#### Ключевые слова:

Плазменное напыление

Высокоскоростное плазменное напыление

Покрытие

WC-Co

HV-APS

Coating

#### Финансирование

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования (проект № 121030500145-0).

#### Благодарности

Исследования выполнены на оборудовании ЦКП «Структура, механические и физические свойства материалов» (соглашение с Минобрнауки № 13.ЦКП.21.0034).

#### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Углеродистая сталь часто используется для изготовления различных деталей машин, но эксплуатация в агрессивных условиях способствует быстрому снижению их свойств вплоть до выхода из строя. Решением данной проблемы является модификация рабочих поверхностей стальных деталей для повышения их износостойкости и коррозионной стойкости, что будет способствовать увеличению срока их службы. Стальные детали с металлокерамическими покрытиями на основе карбида вольфрама WC часто применяются там, где требуются повышенная твердость, износостойкость и коррозионная стойкость. **Цель работы.** Исследовать влияние режимов высокоскоростного плазменного напыления (high velocity plasma spraying, HV-APS) с использованием воздуха в качестве плазмообразующего газа на структуру, фазовый состав и свойства покрытий WC-Co. **Материалы и методики.** В настоящей работе покрытия WC-10Co4Cr наносили на подложку из стали 20 методом HV-APS. Структуру и фазовый состав покрытий анализировали при помощи оптической и растровой электронной микроскопии (РЭМ), а также рентгенофазового анализа (РФА). Кроме того, в работе представлены результаты измерений пористости, микротвердости, износостойкости и качественная оценка адгезии полученных покрытий. **Результаты и обсуждение.** Показано, что все покрытия характеризуются высокой плотностью, отсутствием трещин и оксидных пленок. Установлено, что покрытия состоят из частиц WC и W<sub>2</sub>C, равномерно распределенных в металлической матрице, которая представляет собой аморфный или нанокристаллический пересыщенный твердый раствор Co(W,C). Максимальное количество карбидов (49 %) наблюдается в покрытиях, полученных при дистанции напыления 170 мм, ток дуги – 140 А. Минимальное количество карбидов (25 %) наблюдается при дистанции напыления 250 мм, ток дуги – 200 А. Покрытия с максимальным количеством карбидов обладают максимальными значениями микротвердости (1284 HV<sub>0,1</sub>) и износостойкости. Установлено, что все покрытия характеризуются высокой адгезией. При испытаниях на загиб 180° вокруг направляющего ролика они не отслаивались.

**Для цитирования:** Структура и свойства покрытий WC-10Co4Cr, полученных высокоскоростным плазменным напылением / Е.Е. Корниенко, И.П. Гуляев, В.И. Кузьмин, А.С. Тамбовцев, П.А. Тырышкин // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2023. – Т. 25, № 2. – С. 81–92. – DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.2-81-92.

## Введение

Сталь широко применяется для изготовления различных деталей машин благодаря комплексу высоких механических, технологических и физико-химических свойств. Несмотря на эти преимущества, эксплуатация стальных деталей в агрессивных условиях (высокие температуры,

#### \*Адрес для переписки

Корниенко Елена Евгеньевна, к.т.н., доцент

Новосибирский государственный технический университет,

пр. К. Маркса, 20,

630073, г. Новосибирск, Россия

Тел.: 8 (383) 346-11-71, e-mail: e.kornienko@corp.nstu.ru

износ и коррозионные среды) способствует быстрому снижению их свойств вплоть до выхода из строя. Решением данной проблемы является модификация рабочих поверхностей стальных деталей для повышения их износостойкости и коррозионной стойкости, что будет способствовать увеличению срока их службы [1, 2]. Кроме того, нанесение небольших по толщине покрытий позволит сохранить допустимый уровень вязкости по сечению изделий.

Известно, что стальные детали с металло-керамическими покрытиями на основе карбида вольфрама (WC) часто используются в таких областях промышленности, как нефтедобывающая, авиационная, металлургическая, химическая и машиностроительная, благодаря высокой твердости, износостойкости и коррозионной стойкости [3–6]. К основным технологиям нанесения покрытий из этих материалов относятся HVOF и APS [7–11]. Из-за высокой твердости и хрупкости частицы WC обычно наносят вместе с металлическим связующим, формируя композиционные покрытия. Такие покрытия сочетают в себе высокую пластичность, ударную вязкость и технологичность связующего (Co, Ni, Ti, Fe, Cu и других), а также высокую износостойкость и коррозионную стойкость керамики [12, 13].

Известно, что, изменяя параметры напыления или характеристики напыляемого порошка, можно контролировать структуру и фазовый состав, а значит, и свойства покрытий. Так, в работе [14] установлена зависимость пористости и коррозионной стойкости покрытий WC-12Co, полученных методом HVOF, от температуры нагрева частиц в струе транспортирующего газа. Более высокая температура нагрева способствовала формированию аморфной структуры в покрытиях и повышению коррозионной стойкости. Авторы работы [15] показали, что параметры процесса HVOF при напылении покрытий WC-12Co влияют на фазовый состав, пористость, твердость и позволяют управлять трибологическими характеристиками покрытий. В работах [16–18] утверждается, что использование наноструктурированного порошка WC-Co позволяет значительно повысить твердость, износостойкость и коррозионную стойкость по сравнению с покрытиями, полученными из микронных порошков WC-Co. Использование авторами работы [7] беспористого ультрамелкозернистого по-

рошка WC-Co позволило получить покрытия, состоящие только из WC и аморфной и нанокристаллической матрицы Co, износостойкость которых была в четыре раза выше, чем у покрытий из более крупного порошка. С другой стороны, в работах [19, 20] показано, что при нанесении газотермическими методами большая часть наноразмерного порошка WC успевает разложиться в напылительной струе. Это, в свою очередь, приводит к снижению износостойкости формируемых покрытий. Авторы работы [5] показали, что при плазменном напылении большее влияние на износостойкость оказывает состав плазмообразующего газа Ar/He или Ar/H<sub>2</sub>, а не размер напыляемых частиц. При использовании аргон-гелиевой смеси плазменная струя (с более низкой рабочей температурой) снижает степень обезуглероживания частиц WC и, таким образом, повышает их объемную долю в покрытии. Поскольку покрытия, напыленные Ar/He-струей, имели более высокую объемную долю частиц WC, они характеризовались более высокими значениями твердости, износостойкости, а также ударной вязкости. Авторы сообщают, что при плазменном напылении Ar/He-струей большую износостойкость имели покрытия из наноразмерного порошка, а не из микронного.

Анализируя данные, приведенные в литературе, можно сделать следующий вывод: на сегодняшний день HVOF- и APS-методы получения керметных покрытий достаточно подробно исследованы. Показано, что после отработки технологии напыления конкретного порошка можно достоверно регулировать свойства получаемых покрытий. В связи с вышеизложенным **целью настоящей работы** является исследование влияния режимов HV-APS с использованием воздуха в качестве плазмообразующего газа на структуру, фазовый состав и свойства покрытий WC-Co.

### Методика экспериментального исследования

Объектом исследований в настоящей работе являлись покрытия, сформированные из коммерческого гранулированного порошка WC-10Co4Cr фракцией 15–38 мкм. Сверхзвуковое плазменное напыление HV-APS проводили с использованием электродугового плазмотрона

ПНК-50, разработанного в Институте теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН. В качестве подложки подготавливали шайбы из стали 20 ( $d = 20$  мм,  $s = 7,5$  мм). Покрытие наносили на торцевую поверхность шайб. Перед напылением порошка торцевую поверхность подложек очищали при помощи пескоструйной обработки. Режимы HV-APS приведены в табл. 1. В качестве изменяемого параметра выступали дистанция напыления (170 и 250 мм) и ток дуги (140, 170 и 200 А). В качестве плазмообразующего, транспортирующего и фокусирующего газа использовали воздух с добавкой 4 об. % метана.

Структурные исследования и измерения пористости и микротвердости проводили на поперечных микрошлифах, подготовка которых заключалась в следующем: механическое шлифование при помощи суспензий с частицами  $Al_2O_3$  зернистостью 9, 6, 3 и 1 мкм и финишное полирование на сукне с использованием коллоидного раствора оксида кремния зернистостью 0,04 мкм. Для исследования структуры покрытий использовали оптический микроскоп Olympus GX-51 (Olympus, Япония), оснащенный программным обеспечением OLYMPUS Stream Image Analysis Stream Essentials 1.9.1 для измерения пористости материалов. Кроме того, структурные исследования проводили на растровом электронном микроскопе Carl Zeiss EVO50 XVP с микроанализатором EDS X-Act. Рентгеновский дифрактометр ARL X'TRA использовали для изучения фазового состава в  $CuK\alpha$ -излучении. Режимы съемки: время  $t = 3$  с, шаг  $\Delta 2\theta = 0,05^\circ$ . Микротвердость покрытий оценивали на микротвердомере Wolpert Group 402MVD при нагрузке 100 г [21].

Испытания на износостойкость проводили в соответствии с ASTM G65. Для данного испытания наносили покрытие толщиной 300–350 мкм на пластины размером  $25 \times 75 \times 3$  мм. Во время испытания абразивный материал (электрокорунд) подавался в зону трения и прижимался к образцу вращающимся резиновым роликом. Образец прижимался к ролику рычагом с усилием 44 Н. Частота вращения ролика – 60 об/мин. По результатам взвешивания определяли среднеарифметическое значение потери массы.

Для качественной оценки адгезии покрытий проводили загиб образцов на  $180^\circ$  вокруг направляющего ролика диаметром 10 мм по ASTM E-290.

## Результаты и их обсуждение

### Микроструктурные характеристики покрытий

На рис. 1 представлены рентгенограммы исходного порошка и покрытий, полученных при разных режимах напыления. Видно, что основными фазами порошка являются карбид вольфрама WC (51-939) и кобальт Co (15-806) (рис. 1, а).

Рентгенограммы всех покрытий (рис. 1, б–ж) практически одинаковы: основными фазами являются WC (65-4539) и  $W_2C$  (35-776). Интенсивность пиков фазы WC в покрытиях меньше, чем в порошке, что свидетельствует о меньшей его объемной доле. Фаза  $W_2C$  образуется в результате обезуглероживания WC по реакциям [22]:

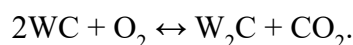
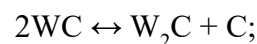


Таблица 1

Table 1

### Режимы HV-APS

#### The modes of HV-APS

Дистанция напыления, мм / Spraying distance, mm	Ток дуги, А / Arc current, A	Обозначение режимов / Spraying modes
170	140	170/140
	170	170/170
	200	170/200
250	140	250/140
	170	250/170
	200	250/200

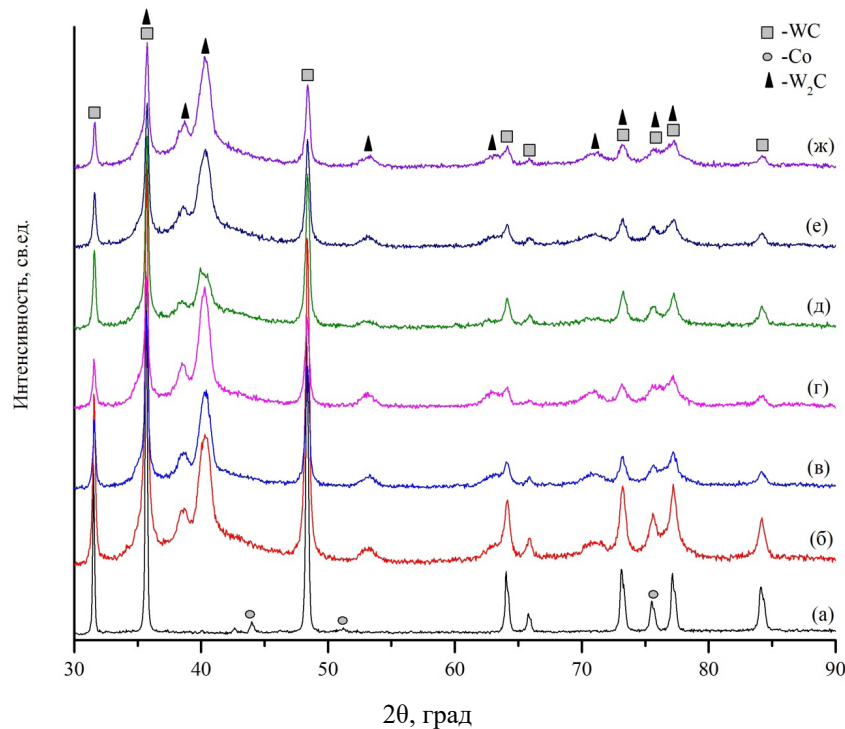


Рис. 1. Рентгенограммы порошка (а) и покрытий, полученных при разных режимах:

б – 170/140; в – 170/170; г – 170/200; д – 250/140; е – 250/170; жс – 250/200

Fig. 1. X-ray diffraction patterns of powder (a) and coatings formed at different modes:

б – 170/140; в – 170/170; г – 170/200; д – 250/140; е – 250/170; жс – 250/200

Смещение дифракционных максимумов фазы  $W_2C$  указывает на изменение межатомных расстояний.

Отсутствие кобальта на рентгенограммах покрытий объясняется тем, что при напылении часть WC растворяется в кобальтовой матрице, а при быстром охлаждении на холодной подложке или уже затвердевших сплэтах формируется аморфный или нанокристаллический пересыщенный твердый раствор  $Co(W,C)$ . На его образование указывает широкое дифракционное гало в диапазоне  $2\theta = 37\text{--}47^\circ$ . Согласно данным работ [22–24] в матрице также возможно формирование  $\eta$ -фаз ( $Co_3W_3C$ ,  $Co_2W_4C$  или  $Co_6W_6C$ ), хотя рентгеноструктурным анализом они идентифицированы не были.

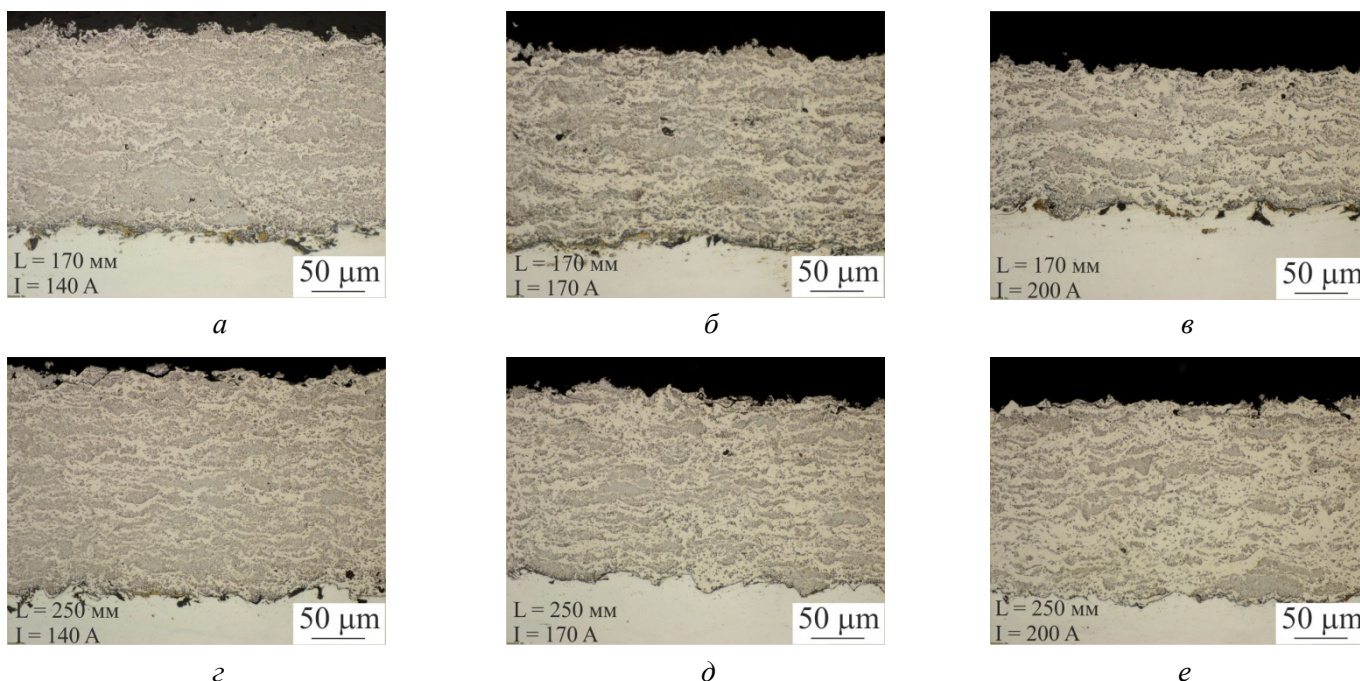
На рис. 2, а–е приведены изображения микроструктуры покрытий, полученных при разных режимах. Их толщина в среднем составляет 150–200 мкм. Все покрытия характеризуются высокой плотностью и хорошей адгезией с подложкой. Отсутствие трещин и выкрошившихся в процессе подготовки карбидных частиц свидетельствует о высокой когезионной прочности.

Все покрытия имеют слоистую структуру, характерную для газотермического напыления.

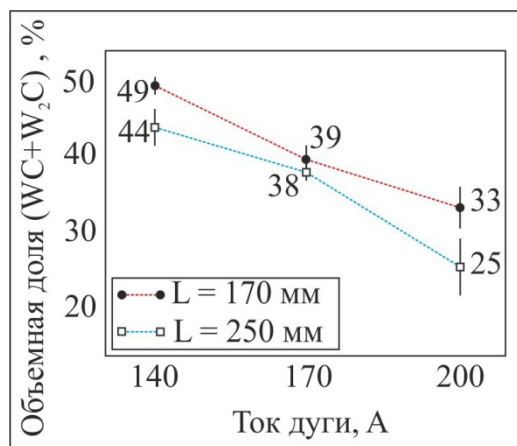
Стоит отметить, что полученные покрытия характеризуются значительной разницей объемной доли карбидов. На рис. 2, а–в (верхний ряд) представлены покрытия, полученные на дистанции напыления 170 мм, а на рис. 2, г–е (нижний ряд) – 250 мм. При напылении изменяли также силу тока: 140 А (рис. 2, а, г), 170 А (рис. 2, б, д) и 200 А (рис. 2, в, е). Видно, что дистанция напыления, как и сила тока, оказывает значительное влияние на количество карбидов. Зависимость объемной доли карбидов от режимов напыления приведена на рис. 3. Видно, что количество WC и  $W_2C$  уменьшается с увеличением силы тока и дистанции напыления. Это связано с тем, что с повышением силы тока повышается температура плазменного потока, что приводит к более высокому нагреву частиц WC. Максимальное количество карбидов (49 %) наблюдается в покрытиях, полученных в режиме 170/140; минимальное (25 %) – в режиме 250/200.

На рис. 4, а представлено РЭМ-изображение покрытия, полученное в режиме BSE. Видно, что





**Рис. 2.** Структура покрытий HV-APS. Режимы:  
*a* – 170/140; *б* – 170/170; *в* – 170/200; *г* – 250/140; *д* – 250/170; *е* – 250/200  
**Fig. 2.** The structure of HV-APS coatings. The modes:  
*a* – 170/140; *б* – 170/170; *в* – 170/200; *г* – 250/140; *д* – 250/170; *е* – 250/200



**Рис. 3.** Зависимость количества карбидов WC+W<sub>2</sub>C в покрытии от режимов напыления  
**Fig. 3.** Dependence of the WC+W<sub>2</sub>C mass fraction on spraying modes

частицы WC расположены внутри сплэтов и имеют разные размеры (участки 4 и 5 на рис. 4, *a*). В покрытиях также наблюдались участки, которые вообще не содержат частиц WC (участки 1–3 на рис. 4, *a*). В зависимости от того, сколько времени частицы карбида вольфрама находятся при высоких температурах, степень их разложения будет отличаться. Известно, что при нагреве в плазменной струе частицы WC начина-

ют оплавляться, и атомы вольфрама и углерода диффундируют в жидкую кобальтовую матрицу. При охлаждении расплавленного материала со скоростями намного выше критических фиксируется аморфный или нанокристаллический пересыщенный твердый раствор Co(W, C). На схеме (рис. 4, *б*) показано, что степень обезуглероживания частиц WC неодинакова в разных сплэтах. Так, в сплэтах с более темной матрицей (участок 5 на рис. 4, *a*) частицы практически не оплавляются в отличие от сплэтов с более светлой матрицей (участок 4 на рис. 4, *a*). В зависимости от количества вольфрама и углерода, растворенных в кобальте, матрица характеризуется различными оттенками серого цвета. Согласно данным микрорентгеноспектрального анализа (табл. 2) в более светлых участках (участок 1 на рис. 4, *a*) содержится больше вольфрама, а в более темных (участок 3 на рис. 4, *a*) – меньше. Полученные данные хорошо согласуются с данными работы [5].

**Механические свойства и износостойкость покрытий**

Результаты измерений средних значений микротвердости покрытий в зависимости от режима напыления представлены на рис. 5. Видно,

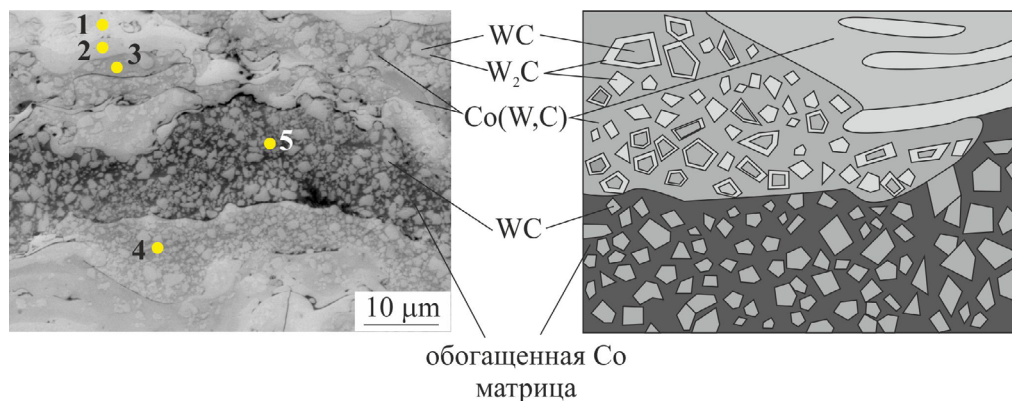


Рис. 4. РЭМ-изображение (а) и схема (б) покрытия WC-Co

Fig. 4. SEM micrograph (a) and scheme (b) of plasma WC-Co coating

Таблица 2

Table 2

### Микрорентгеноспектральный анализ покрытий

#### Electron microprobe analysis of coatings

№ области / № area	Химический элемент, вес. % / Chemical element, wt. %			
	W	Co	C	Cr
1	92,84	2,89	3,52	0,74
2	87,69	3,28	8,23	0,8
3	80,59	7,95	7,45	4
4	79,17	9,08	6,83	4,91
5	77,65	10,52	7,87	3,95

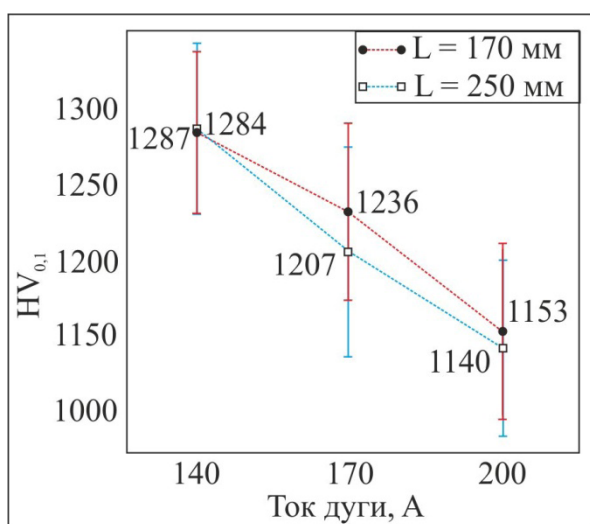


Рис. 5. Микротвердость покрытий, полученных при разных режимах

Fig. 5. Microhardness of coatings formed on different modes

что увеличение силы тока способствует снижению значений микротвердости, это можно объяснить уменьшением объемной доли карбидов в

покрытиях. Влияние дистанции напыления незначительно, при этом твердость покрытий, полученных на 250 мм, чуть ниже. Максимальная микротвердость (1284 и 1287  $HV_{0,1}$ ) характерна для покрытий, полученных в режимах 170/140 и 250/140. Самые низкие значения микротвердости (1153 и 1140  $HV_{0,1}$ ) наблюдаются у покрытий, полученных в режимах 170/200 и 250/200. В среднем микротвердость участков с карбидами составляет  $1432 \pm 107 HV_{0,1}$ , матрицы –  $772 \pm 93 HV_{0,1}$ . Эти данные хорошо согласуются с данными работ [9, 25].

Результаты испытаний покрытий на износ о нежестко закрепленные частицы абразива приведены на рис. 6. Видно, что максимальная износостойкость характерна для образцов с покрытиями, полученными в режиме 170/140 (относительная износостойкость 0,21), минимальная – для образцов, полученных в режиме 250/200 (относительная износостойкость 0,14). Снижение износостойкости можно объяснить уменьшением объемной доли карбидной фазы,

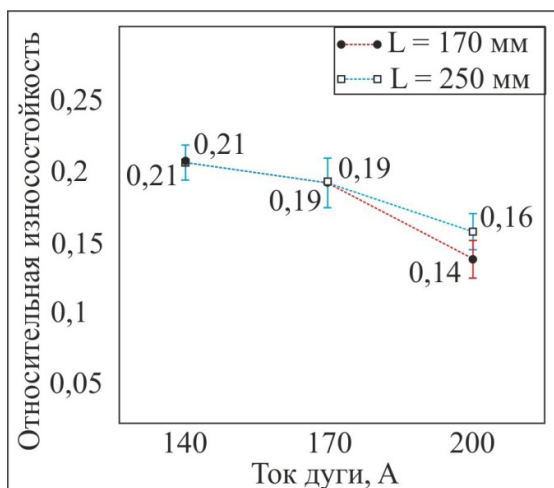


Рис. 6. Относительная износостойкость покрытий, полученных при разных режимах

Fig. 6. Relative wear resistance of coatings formed by different modes

что также хорошо коррелирует с результатами измерений микротвердости.

Для оценки адгезии покрытий в работе были проведены испытания на направляемый загиб  $180^\circ$ . Во всех случаях покрытия растрескались в области изгиба, но не отслоились. На рис. 7 представлены изображения поверхности пластин с покрытиями, полученными в режимах 170/140 (рис. 7, а) и 250/200 (рис. 7, б), после испытания. Видно, что трещины в покрытиях практически прямолинейны, без разветвлений. Расстояние между трещинами увеличивается с увеличением тока и дистанции напыления. Полученные данные свидетельствуют о высокой адгезии покрытий.

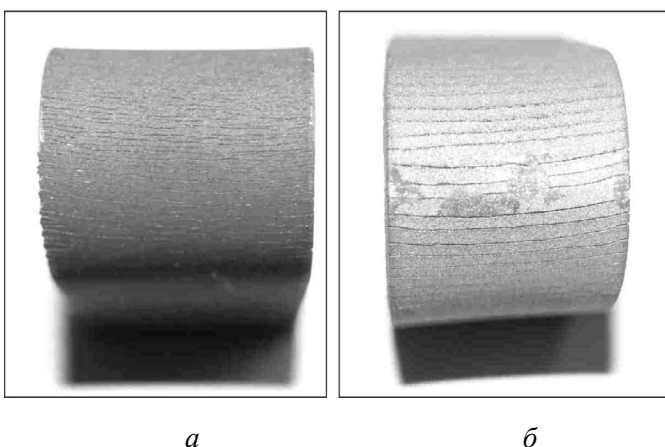


Рис. 7. Образцы с покрытиями после испытаний на изгиб:

а – 170/140; б – 250/200

Fig. 7. The specimens with coating after bend test:

а – 170/140; б – 250/200

## Выводы

1. Метод HV-APS позволяет формировать высококачественные металлокерамические покрытия WC-Co, характеризующиеся высокой плотностью, отсутствием трещин и оксидных пленок.

2. Согласно данным, полученным с помощью РЭМ и РФА, покрытия состоят из частиц WC и  $W_2C$ , равномерно распределенных в металлической матрице. Матрица представляет собой аморфный или нанокристаллический пересыщенный твердый раствор Co(W,C).

3. Методом оптической микроскопии показано, что дистанция напыления, как и сила тока, оказывает значительное влияние на объемную долю карбидов. Максимальное количество карбидов (49 %) наблюдается в покрытиях, полученных в режиме 170/140, минимальное (25 %) – в покрытиях, полученных в режиме 250/200.

4. Установлено, что максимальная микротвердость (1284 и 1287  $HV_{0,1}$ ) характерна для покрытий, полученных в режимах 170/140 и 250/140; минимальные значения микротвердости (1153 и 1140  $HV_{0,1}$ ) наблюдаются у покрытий, полученных в режимах 170/200 и 250/200.

5. Выявлено, что максимальная износостойкость характерна для образцов с покрытиями, полученными в режиме 170/140 (относительная износостойкость 0,21), минимальная – для образцов, полученных в режиме 250/200 (относительная износостойкость 0,14).

6. Показано, что все покрытия характеризуются высокой адгезией. При испытаниях на трехточечный изгиб покрытия не отслаивались.

## Список литературы

1. Surface modification of air plasma spraying WC-12%Co cermet coating by laser melting technique / M. Afzal, M. Ajmal, A. Nusair Khan, A. Hussain, R. Akhter // Optics Laser. – 2014. – Vol. 56. – P. 202–206. – DOI: 10.1016/j.optlastec.2013.08.017.

2. Microstructure and cavitation erosion behavior of WC-Co-Cr coating on 1Cr18Ni9Ti stainless steel by HVOF thermal spraying / Y. Wu, S. Hong, J. Zhang, Z. He, W. Guo, Q. Wang, G. Li // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2012. – Vol. 32. – P. 21–26. – DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2012.01.002.

3. Interdependence of slurry erosion wear performance and residual stress in WC-12wt%Co and WC-10wt%VC-12wt%Co HVOF coatings / A.M. Venter,



- V. Luzin, D. Maraisa, N. Sacks, E.N. Ogunmuyiwa, P.H. Shipway // *International Journal Refractory Metals and Hard Materials*. – 2020. – Vol. 87. – P. 105101. – DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2019.105101.
4. Mechanical properties of WC-Co coatings with different decarburization levels / X. Wu, Z.M. Guo, H.B. Wang, X.Y. Song // *Rare Metals*. – 2014. – Vol. 33, iss. 3. – P. 313–317. – DOI: 10.1007/s12598-014-0257-8.
5. Microstructure and wear behavior of conventional and nanostructured plasma-sprayed WC-Co coatings / E. Sanchez, E. Bannier, M.D. Salvador, V. Bonache, J.C. Garcia, J. Morgiel, J. Grzonka // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2010. – Vol. 19, iss. 5. – P. 964–974. – DOI: 10.1007/s11666-010-9480-5.
6. Liu S.L., Zheng X.P., Geng G.Q. Influence of nano-WC-12Co powder addition in WC-10Co-4Cr AC-HVAF sprayed coatings on wear and erosion behavior // *Wear*. – 2010. – Vol. 269, iss. 5–6. – P. 362–367. – DOI: 10.1016/j.wear.2010.04.019.
7. Wear resistance enhancement of HVOF-sprayed WC-Co coating by complete densification of starting powder / H. Wang, Q. Qiu, M. Gee, C. Hou, X. Liu, X. Song // *Materials and Design*. – 2020. – Vol. 191. – P. 108586. – DOI: 10.1016/j.matdes.2020.108586.
8. Influence of the handling parameters on residual stresses of HVOF-sprayed WC-12Co coatings / U. Selvadurai, P. Hollingsworth, I. Baumann, B. Hussong, W. Tillmann, S. Rausch, D. Biermann // *Surface and Coatings Technology*. – 2015. – Vol. 268. – P. 30–35. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2014.11.055.
9. Ghadami F., Sohi M.H., Ghadami S. Effect of bond coat and post-heat treatment on the adhesion of air plasma sprayed WC-Co coatings // *Surface and Coatings Technology*. – 2015. – Vol. 261. – P. 289–294. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2014.11.016.
10. Yin B., Zhou H.D., Yi D.L. Microsliding wear behavior of HVOF sprayed conventional and nanostructured WC-12Co coatings at elevated temperatures // *Surface Engineering*. – 2010. – Vol. 26, iss. 6. – P. 469–477. – DOI: 10.1179/026708410X12506870724352.
11. Effects of the dispersion time on the microstructure and wear resistance of WC/Co-CNTs HVOF sprayed coatings / M.A. Rodriguez, L. Gil, S. Camero, N. Freyre, Y. Santana, J. Caro // *Surface and Coatings Technology*. – 2014. – Vol. 258. – P. 38–48. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2014.10.014.
12. Effects of WC-Ni content on microstructure and wear resistance of laser cladding Ni-based alloys coating / C. Guo, J. Chen, J. Zhou, J. Zhao, L. Wang, Y. Yu, H. Zhou // *Surface and Coatings Technology*. – 2012. – Vol. 206. – P. 2064–2071. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2011.06.005.
13. Effect of WC-12Co content on wear and electrochemical corrosion properties of Ni-Cu/WC-12Co composite coatings deposited by laser cladding / J. Zhang, J. Lei, Z. Gu, F. Tantai, H. Tian, J. Han, Y. Fang // *Surface and Coatings Technology*. – 2020. – Vol. 393. – P. 125807. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2020.125807.
14. Jalali Azizpour M., Tolouei-Rad M. The effect of spraying temperature on the corrosion and wear behavior of HVOF thermal sprayed WC-Co coatings // *Ceramics International*. – 2019. – Vol. 45, iss. 11. – P. 13934–13941. – DOI: 10.1016/j.ceramint.2019.04.091.
15. HVOF sprayed WC-Co coatings: microstructure, mechanical properties and friction moment prediction / T. Sahraoui, S. Guessasma, M. Ali Jeridane, M. Hadji // *Materials and Design*. – 2010. – Vol. 31, iss. 3. – P. 1431–1437. – DOI: 10.1016/j.matdes.2009.08.037.
16. He J., Schoenung J.M. A review on nanostructured WC-Co coatings // *Surface and Coatings Technology*. – 2002. – Vol. 157, iss. 1. – P. 72–79. – DOI: 10.1016/S0257-8972(02)00141-X.
17. Simultaneous increase of friction coefficient and wear resistance through hvof sprayed WC-(nano WC-Co) / P.H. Gao, B.Y. Chen, W. Wang, H. Jia, J.P. Li, Z. Yang, Y.C. Guo // *Surface and Coatings Technology*. – 2019. – Vol. 363. – P. 379–389. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2019.02.042.
18. Ghosh G., Sidpara A., Bandyopadhyay P.P. Understanding the role of surface roughness on the tribological performance and corrosion resistance of WC-Co coating // *Surface and Coatings Technology*. – 2019. – Vol. 378. – P. 125080. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2019.125080.
19. Dent A.H., Palo S., Sampath S. Examination of the wear properties of HVOF sprayed nanostructured and conventional WC-Co cermets with different binder phase contents // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2002. – Vol. 11 (4). – P. 551–558. – DOI: 10.1361/105996302770348691.
20. Baik K.H., Kim J.H., Seong B.G. Improvements in hardness and wear resistance of thermally sprayed WC-Co nanocomposite coatings // *Materials Science and Engineering: A*. – 2007. – Vol. 449–451. – P. 846–849. – DOI: 10.1016/j.msea.2006.02.295.
21. Интерметаллидные покрытия Al<sub>3</sub>Ti, сформированные при помощи холодного газодинамического напыления и термической обработки / Е.Е. Корниенко, А.Д. Вялова, В.С. Шикалов, В.Ф. Косарев, Т.М. Видюк // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2020. – Т. 22, № 1. – С. 80–89. – DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.1-80-89.
22. Quantitative evaluation of the decarburization and microstructure evolution of WC-Co during plasma spraying / Q. Zhan, L. Yu, F. Ye, Q. Xue, H. Li // *Surface and Coatings Technology*. – 2012. – Vol. 206. – P. 4068–4074. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2012.03.091.





23. Decarburization mechanisms of WCeCo during thermal spraying: insights from controlled carbon loss and microstructure characterization / J. Yuan, Q. Zhan, J. Huang, S. Ding, H. Li // *Materials Chemistry and Physics*. – 2013. – Vol. 142. – P. 165–171. – DOI: 10.1016/j.matchemphys.2013.06.052.

24. FIB-SEM sectioning study of decarburization products in the microstructure of HVOF-sprayed WC-Co coatings / V. Katranidis, S. Gu, D.C. Cox, M.J. Whit-

ing, S. Kamnis // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2018. – Vol. 27. – P. 898–908. – DOI: 10.1007/s11666-018-0721-3.

25. *Fu D., Xiong H., Wang Q.* Microstructure evolution and its effect on the wear performance of HVOF-sprayed conventional WC-Co coating // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2016. – Vol. 25. – P. 4352–4358. – DOI: 10.1007/s11665-016-2278-y.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.





© 2023 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).

## Structure and properties of WC-10Co4Cr coatings obtained with high velocity atmospheric plasma spraying



Elena Kornienko<sup>1, a,\*</sup>, Igor Gulyaev<sup>2, b</sup>, Viktor Kuzmin<sup>2, c</sup>, Alexandr Tambovtsev<sup>2, d</sup>, Pavel Tyryshkin<sup>2, e</sup>

<sup>1</sup> Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

<sup>2</sup> Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS, 4/1 Institutskaya str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

<sup>a</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-5874-5422>,  [e.kornienko@corp.nstu.ru](mailto:e.kornienko@corp.nstu.ru), <sup>b</sup>  <https://orcid.org/0000-0001-5186-6793>,  [gulyaev@itam.nsc.ru](mailto:gulyaev@itam.nsc.ru),

<sup>c</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-9951-7821>,  [vikuzmin57@mail.ru](mailto:vikuzmin57@mail.ru), <sup>d</sup>  <http://orcid.org/0000-0003-1635-9352>,  [alsetam123@icloud.com](mailto:alsetam123@icloud.com),

<sup>e</sup>  <https://orcid.org/0009-0009-8125-6772>,  [pavel99730@gmail.com](mailto:pavel99730@gmail.com)

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received: 24 March 2023

Revised: 02 April 2023

Accepted: 08 April 2023

Available online: 15 June 2023

#### Keywords:

Plasma spraying  
 High velocity atmospheric plasma spraying  
 Coating  
 WC-Co  
 HV-APS

#### Funding

The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education (project No. 121030500145-0).

#### Acknowledgements

Research was partially conducted at core facility "Structure, mechanical and physical properties of materials".

### ABSTRACT

**Introduction.** Carbon steel is often used for the manufacture of various machine parts, but its operation in aggressive conditions (operation of steel parts under conditions of wear, high temperatures and aggressive corrosive environments) contributes to an extreme decline in properties, up to failure. To solve this problem the modification of the working surfaces of steel parts can be used. It increases its wear resistance, corrosion resistance, and service life. Metal-ceramic coatings based on WC are often used to improve the hardness, wear resistance and corrosion resistance of steel parts. The work purpose is to study the effect of high velocity atmospheric plasma spraying (HV-APS) modes on the structure, phase composition and properties of WC-Co coatings. **Materials and methods.** 86% WC-10% Co-4% Cr coatings were deposited on a mild steel substrate with help of the HV-APS method. The structure and phase composition of the coatings were analyzed using optical microscopy, scanning electron microscopy, and X-ray phase analysis. In addition, the results of measurements of porosity, microhardness, wear resistance, as well as a qualitative assessment of the adhesion are shown in this paper. Results and discussion. It is shown that all coatings are characterized by high density, absence of cracks and oxide films. Using the SEM and XRD methods, it is found that the coatings contain WC and W<sub>2</sub>C particles uniformly distributed in the metal matrix. The matrix is an amorphous or nanocrystalline supersaturated Co(W,C) solid solution. The maximum amount of carbides (49 %) is observed in coatings obtained by deposition from a distance of 170 mm, arc current – 140 A; the minimum (25 %) is observed in coatings obtained by deposition from a distance of 250 mm, arc current – 200 A. The coatings with the maximum amount of carbides have the maximum values of microhardness (1,284 HV<sub>0.1</sub>) and wear resistance. It is established that all coatings are characterized by high adhesion.

**For citation:** Kornienko E.E., Gulyaev I.P., Kuzmin V.I., Tambovtsev A.S., Tyryshkin P.A. Structure and properties of WC-10Co4Cr coatings obtained with high velocity atmospheric plasma spraying. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2023, vol. 25, no. 2, pp. 81–92. DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.2-81-92. (In Russian).

### References

1. Afzal M., Ajmal M., Nusair Khan A., Hussain A., Akhter R. Surface modification of air plasma spraying WC-12% Co cermet coating by laser melting technique. *Optics Laser*, 2014, vol. 56, pp. 202–206. DOI: 10.1016/j.optlasec.2013.08.017.

#### \* Corresponding author

Kornienko Elena E., Ph.D. (Engineering), Associate Professor  
 Novosibirsk State Technical University,  
 20 Prospekt K. Marksa,  
 630073, Novosibirsk, Russian Federation  
 Tel.: 8 (383) 346-11-71, e-mail: [e.kornienko@corp.nstu.ru](mailto:e.kornienko@corp.nstu.ru)

2. Wu Y., Hong S., Zhang J., He Z., Guo W., Wang Q., Li G. Microstructure and cavitation erosion behavior of WC-Co-Cr coating on 1Cr18Ni9Ti stainless steel by HVOF thermal spraying. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2012, vol. 32, pp. 21–26. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2012.01.002.
3. Venter A.M., Luzin V., Maraisa D., Sacks N., Ogunmuyiwa E.N., Shipway P.H. Interdependence of slurry erosion wear performance and residual stress in WC-12wt%Co and WC-10wt%VC-12wt%Co HVOF coatings. *International Journal Refractory Metals and Hard Materials*, 2020, vol. 87, p. 105101. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2019.105101.
4. Wu X., Guo Z.M., Wang H.B., Song X.Y. Mechanical properties of WC-Co coatings with different decarburization levels. *Rare Metals*, 2014, vol. 33, iss. 3, pp. 313–317. DOI: 10.1007/s12598-014-0257-8.
5. Sanchez E., Bannier E., Salvador M.D., Bonache V., Garcia J.C., Morgiel J., Grzonka J. Microstructure and wear behavior of conventional and nanostructured plasma-sprayed WC-Co coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2010, vol. 19, iss. 5, pp. 964–974. DOI: 10.1007/s11666-010-9480-5.
6. Liu S.L., Zheng X.P., Geng G.Q. Influence of nano-WC-12Co powder addition in WC-10Co-4Cr AC-HVAF sprayed coatings on wear and erosion behavior. *Wear*, 2010, vol. 269, iss. 5–6, pp. 362–367. DOI: 10.1016/j.wear.2010.04.019.
7. Wang H., Qiu Q., Gee M., Hou C., Liu X., Song X. Wear resistance enhancement of HVOF-sprayed WC-Co coating by complete densification of starting powder. *Materials and Design*, 2020, vol. 191, p. 108586. DOI: 10.1016/j.matdes.2020.108586.
8. Selvadurai U., Hollingsworth P., Baumann I., Hussong B., Tillmann W., Rausch S., Biermann D. Influence of the handling parameters on residual stresses of HVOF-sprayed WC-12Co coatings. *Surface and Coatings Technology*, 2015, vol. 268, pp. 30–35. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2014.11.055.
9. Ghadami F., Sohi M.H., Ghadami S. Effect of bond coat and post-heat treatment on the adhesion of air plasma sprayed WC-Co coatings. *Surface and Coatings Technology*, 2015, vol. 261, pp. 289–294. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2014.11.016.
10. Yin B., Zhou H.D., Yi D.L. Microsliding wear behavior of HVOF sprayed conventional and nanostructured WC-12Co coatings at elevated temperatures. *Surface Engineering*, 2010, vol. 26, iss. 6, pp. 469–477. DOI: 10.1179/026708410X12506870724352.
11. Rodriguez M.A., Gil L., Camero S., Frerly N., Santana Y., Caro J. Effects of the dispersion time on the microstructure and wear resistance of WC/Co-CNTs HVOF sprayed coatings. *Surface and Coatings Technology*, 2014, vol. 258, pp. 38–48. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2014.10.014.
12. Guo C., Chen J., Zhou J., Zhao J., Wang L., Yu Y., Zhou H. Effects of WC-Ni content on microstructure and wear resistance of laser cladding Ni-based alloys coating. *Surface and Coatings Technology*, 2012, vol. 206, pp. 2064–2071. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2011.06.005.
13. Zhang J., Lei J., Gu Z., Tantai F., Tian H., Han J., Fang Y. Effect of WC-12Co content on wear and electrochemical corrosion properties of Ni-Cu/WC-12Co composite coatings deposited by laser cladding. *Surface and Coatings Technology*, 2020, vol. 393, p. 125807. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2020.125807.
14. Jalali Azizpour M., Tolouei-Rad M. The effect of spraying temperature on the corrosion and wear behavior of HVOF thermal sprayed WC-Co coatings. *Ceramics International*, 2019, vol. 45, iss. 11, pp. 13934–13941. DOI: 10.1016/j.ceramint.2019.04.091.
15. Sahraoui T., Guessasma S., Ali Jeridane M., Hadji M. HVOF sprayed WC-Co coatings: microstructure, mechanical properties and friction moment prediction. *Materials and Design*, 2010, vol. 31, iss. 3, pp. 1431–1437. DOI: 10.1016/j.matdes.2009.08.037.
16. He J., Schoenung J.M. A review on nanostructured WC-Co coatings. *Surface and Coatings Technology*, 2002, vol. 157, iss. 1, pp. 72–79. DOI: 10.1016/S0257-8972(02)00141-X.
17. Gao P.H., Chen B.Y., Wang W., Jia H., Li J.P., Yang Z., Guo Y.C. Simultaneous increase of friction coefficient and wear resistance through hvof sprayed WC-(nano WC-Co). *Surface and Coatings Technology*, 2019, vol. 363, pp. 379–389. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2019.02.042.
18. Ghosh G., Sidpara A., Bandyopadhyay P.P. Understanding the role of surface roughness on the tribological performance and corrosion resistance of WC-Co coating. *Surface and Coatings Technology*, 2019, vol. 378, p. 125080. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2019.125080.
19. Dent A.H., Palo S., Sampath S. Examination of the wear properties of HVOF sprayed nanostructured and conventional WC-Co cermets with different binder phase contents. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2002, vol. 11 (4), pp. 551–558. DOI: 10.1361/105996302770348691.

20. Baik K.H., Kim J.H., Seong B.G. Improvements in hardness and wear resistance of thermally sprayed WC-Co nanocomposite coatings. *Materials Science and Engineering: A*, 2007, vol. 449–451, pp. 846–849. DOI: 10.1016/j.msea.2006.02.295.

21. Kornienko E., Vyalova A., Shikalov V., Kosarev V., Vidyuk T. Intermetallidnye pokrytiya  $Al_3Ti$ , sformirovannye pri pomoshchi kholodnogo gazodinamicheskogo napyleniya i termicheskoi obrabotki [ $Al_3Ti$  Intermetallic coatings obtained with help gas dynamic cold spray and heat treatment]. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2020, vol. 22, no. 1, pp. 80–89. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.1-80-89.

22. Zhan Q., Yu L., Ye F., Xue Q., Li H. Quantitative evaluation of the decarburization and microstructure evolution of WC-Co during plasma spraying. *Surface and Coatings Technology*, 2012, vol. 206, pp. 4068–4074. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2012.03.091.

23. Yuan J., Zhan Q., Huang J., Ding S., Li H. Decarburization mechanisms of WCeCo during thermal spraying: insights from controlled carbon loss and microstructure characterization. *Materials Chemistry and Physics*, 2013, vol. 142, pp. 165–171. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2013.06.052.

24. Katranidis V., Gu S., Cox D.C., Whiting M.J., Kamnis S. FIB-SEM sectioning study of decarburization products in the microstructure of HVOF-sprayed WC-Co coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2018, vol. 27, pp. 898–908. DOI: 10.1007/s11666-018-0721-3.

25. Fu D., Xiong H., Wang Q. Microstructure evolution and its effect on the wear performance of HVOF-sprayed conventional WC-Co coating. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2016, vol. 25, pp. 4352–4358. DOI: 10.1007/s11665-016-2278-y.

## Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2023 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).