

Научная статья

УДК 629.7.023

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-10-100-115

## РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ГАЗОТЕРМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ УПРОЧНЯЮЩИХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ КАРБИДОВ ВОЛЬФРАМА И ХРОМА (обзор)

Я.С. Дружнова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

**Аннотация.** Рассмотрена тенденция замены гальванического хромирования, применяемого для защиты стальных деталей от коррозии и износа, на газотермические методы нанесения покрытий с использованием композиционных порошков на основе карбидов вольфрама и хрома. Рассмотрены разновидности газотермического напыления, методы изготовления композиционных порошков, описаны их достоинства и недостатки. Установлено, что наиболее распространенным методом нанесения износостойких покрытий является метод высокоскоростного газопламенного напыления. На примере показано превосходство такого покрытия по сравнению с покрытием, нанесенным гальваническим хромированием. Обозначено направление развития в области изготовления композиционных порошков с необходимыми технологическими свойствами для получения износостойких покрытий с оптимальными характеристиками.

**Ключевые слова:** газопламенное напыление, детонационное напыление, плазменное напыление, высокоскоростное газопламенное напыление, композиционный порошок, металлокерамические покрытия, распылительная сушка, механическое легирование, высокотемпературное спекание

**Для цитирования:** Дружнова Я.С. Развитие методов газотермического напыления упрочняющих покрытий на основе карбидов вольфрама и хрома (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 10 (116). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-10-100-115.

Scientific article

## DEVELOPMENT OF METHODS FOR THERMAL SPRAYING OF HARDENING TIRES BASED ON TUNGSTEN AND CHROMIUM CARBIDES (review)

Ya.S. Druzhnova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

**Abstract.** Considers the trend of replacing galvanic chromium plating, used to protect steel parts from corrosion and wear, by gas-thermal coating methods using composite powders based on tungsten and chromium carbides. Varieties of thermal spraying, methods for manufacturing composite powders are considered, their advantages and disadvantages are described. It has been established that the most common method of applying wear-corrosion-resistant coatings is the high-velocity oxygen fuel spraying method. The example shows the superiority of such a coating compared to galvanic chromium plating. The direction of development in the field of manufacturing composite powders with the necessary technological properties to obtain wear-corrosion-resistant coatings with optimal characteristics is indicated.

**Keywords:** *flame spraying, detonation spraying, plasma spraying, high-velocity oxygen fuel spraying, composite powder, ceramic-metal coatings, spray dry, mechanical alloying, spark plasma sintering*

**For citation:** Druzhnova Ya.S. Development of methods for thermal spraying of hardening tires based on tungsten and chromium carbides (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 10 (116), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-10-100-115.

### Введение

Гальваническое хромирование получило широкое применение в современном машиностроении в качестве коррозионностойкого износостойкого покрытия для ответственных деталей, таких как шаровые клапаны, штоки и поршни, валы, поршневые кольца, посадочные поверхности для подшипников и многих других. Подавляющее большинство изделий, подвергаемых гальваническому хромированию в промышленных производственных процессах, изготавливаются из высокопрочных сталей. Широкое распространение гальванического хромирования объясняется простотой технической организации технологического процесса и доступностью исходных материалов. Однако применение гальванических хромовых покрытий для защиты титановых и алюминиевых сплавов приводит к существенному усложнению технологии нанесения, что подразумевает использование промежуточных соединительных слоев, и в совокупности приводит к ухудшению как конечных характеристик покрытий, так и технико-экономических показателей. Для современных металлокерамических композиционных материалов в ряде случаев гальваническое покрытие практически не применимо. Указанные естественные ограничения для применения гальванического хромирования приводят к необходимости выбора альтернативных покрытий и технологий их нанесения для защиты как высокопрочных сталей, так и более современных конструкционных материалов.

Специалистами в области медицины проведены исследования для установления причинно-следственной связи между применением гальванического напыления и развитием впоследствии раковых клеток у человека. Это было связано с тем, что с начала 1970-х гг. повысилась смертность рабочих от рака. Основным химическим веществом, оказывающим негативное влияние на здоровье человека, являлся шестивалентный хром, который образуется в процессе гальванического хромирования. В связи с этим было принято решение ужесточить экологический контроль гальванических процессов.

В качестве альтернативы гальваническому хромированию ведущими производителями авиационной техники рассматриваются газотермические покрытия на основе карбидов вольфрама и хрома. Наиболее широкое распространение получили покрытия систем WC-Co, WC-Co-Cr и Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr. Важнейшим преимуществом указанных покрытий при работе в паре трения с металлическими поверхностями является структура, соответствующая принципу Шарпи, которая содержит армирующую фазу на основе твердого карбида металла, закрепленную в пластичной металлической связке. Такая структура обеспечивает высокие характеристики прирабатываемости пары трения и высокий ресурс. Покрытия на основе карбидов вольфрама и хрома, наносимые методом газотермического напыления, применяются для защиты деталей авиационной техники из сталей, а также сплавов на основе никеля и титана [1].

Важным преимуществом газотермических металлокерамических покрытий (по сравнению с твердым гальваническим хромированием) для защиты поверхностей штоков и поршней гидро- и пневмоцилиндров является более высокая микротвердость основного компонента покрытия:

Компонент	Cr <sub>ТВ</sub>	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	WC
Микротвердость, ГПа	6,8–9,3	10,4–20,2	13–22,

которая обеспечивает существенное повышение эрозионной стойкости как при прямом ударном воздействии абразива, так и при истирающем воздействии абразивных частиц, загрязняющих поверхность уплотнительных материалов.

### Материалы и методы

С учетом относительно высокой стойкости к окислению и коррозии металлокерамической композиции  $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ , данные покрытия начали широко применяться для нанесения износо-коррозионностойких покрытий на стальные элементы в горячей части котлов для сжигания отходов, а также в электрических печах и оборудовании, работающем на природном газе [2, 3]. Эти металлокерамические покрытия наносят с помощью разных способов газотермического напыления, таких как плазменное напыление, метод детонационного напыления, а также высокоскоростного газоплазменного напыления [4–10]. На рис. 1 представлены соотношения скоростей частиц и температур для различных методов газотермического напыления.

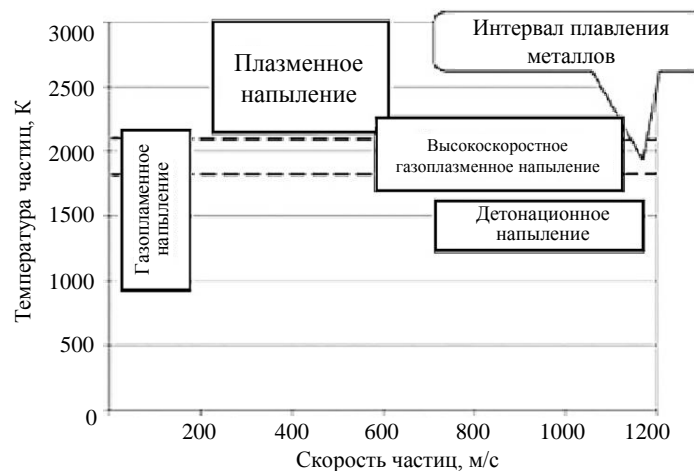


Рис. 1. Соотношения скоростей частиц и температур для различных методов газотермического напыления

Металлокерамические покрытия системы  $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ , полученные методами газотермического напыления, используются также для снижения изнашивания и защиты от коррозии при высоких температурах в деталях газовых турбин, работающих в условиях сухого трения и применяемых в различных отраслях промышленности: электроэнергетике и нефтепереработке, аэрокосмической индустрии [11–18].

Металлокерамические покрытия на основе карбида вольфрама широко применяются при защите деталей от механического износа, однако их применение ограничено при повышенных температурах ( $>500\text{ }^\circ\text{C}$ ) или в химически агрессивных средах из-за деградации карбидной фазы [19, 20]. Работа выполнена при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

### *Метод газоплазменного напыления*

В настоящее время области применения метода газоплазменного напыления – это нанесение покрытий на основе тугоплавких керамических материалов, а также самофлюсующихся терморреагирующих металлических сплавов на основе железа, кобальта и никеля. Распыляемый материал в виде порошка, проволоки или шнура расплавляется в кислородно-ацетиленовом пламени, а затем ускоряется газообразными продуктами сгорания при нанесении на поверхность обрабатываемой детали (рис. 2).

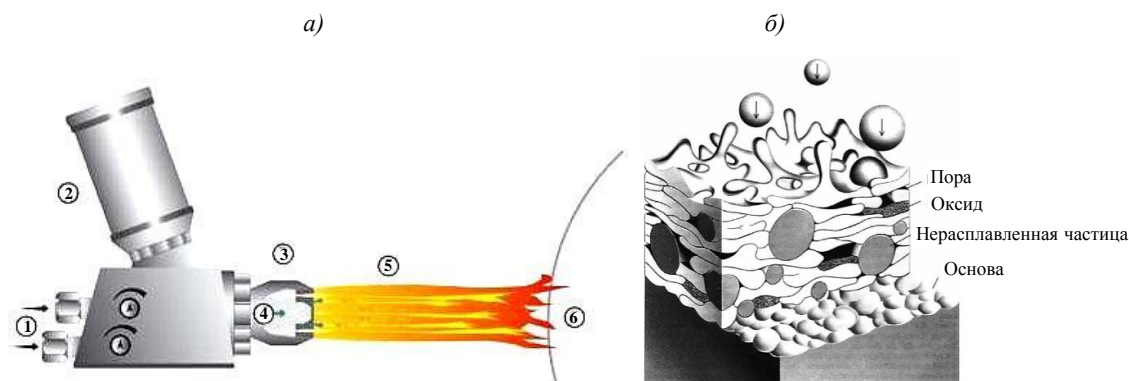


Рис. 2. Принципиальная схема газопламенного напыления порошком (а: 1 – кислород/ацетилен; 2 – контейнер с порошком; 3 – горелка; 4 – порошок + газ; 5 – ацетилен-кислородное пламя и напыляемые частицы; 6 – деталь) и схема формирования напыленного покрытия (б)

Из бункерного устройства порошок поступает в горелку с потоком транспортирующей газовой смеси (кислород и горючий газ) и попадает в пламя горелки. Расплавленные частицы порошка, увлекаемые струей горячего газа, с высокой скоростью ударяются о напыляемую поверхность, деформируются и, мгновенно охлаждаясь, конденсируются на неровностях подложки. Так, при нанесении нескольких слоев покрытия, износостойкое покрытие достигает требуемой величины. В настоящее время существуют автоматизированные устройства для нанесения покрытий. В таком оборудовании порошок подается в пламя под давлением вдоль оси горелки из специализированных порошковых питателей, обладающих высокой точностью дозирования.

К достоинствам метода можно отнести:

- низкую стоимость;
- удобство и вариативность применения;
- выполнение напыления покрытий на внутренние поверхности с диаметром не менее 100 мм и на глубину не более калибра отверстия;
- доступность порошковых материалов;
- незначительное влияние на окружающую среду.

Основным недостатком данного метода является пористость получаемых покрытий на уровне не менее 5 %.

#### *Высокоскоростное газопламенное напыление*

Метод высокоскоростного газопламенного напыления [21] является одной из разновидностей газопламенного напыления. Основное отличие оборудования для такого напыления – это наличие реактивного сопла (сопло Лавалья), которое позволяет достичь сверхзвуковой скорости струи горячих газов (рис. 3). Увеличение скорости потока струи в установках высокоскоростного газопламенного нанесения покрытий дает возможность снизить пористость покрытия.

В настоящее время наиболее подходящей альтернативой хромированию можно считать высокоскоростное газопламенное напыление карбида вольфрама. У данного метода скорость частиц в потоке достигает 450–1000 м/с – приблизительно в 2 раза больше, чем у других методов газопламенного напыления. Например, у покрытия состава WC–10Co–4Cr твердость может достигать 1400 HV300. Высокая твердость, адгезионная прочность, низкая пористость покрытий, получаемых методом высокоскоростного напыления, обеспечивают возможность их применения в агрессивных средах при повышенной температуре в энергетике, металлургии и авиации. Данные покрытия

применяются в различных деталях самолета – шасси, гидравлических цилиндрах, подшипниках реактивных двигателей, валах турбин и др. В перспективе износостойкие покрытия, получаемые методом высокоскоростного напыления, полностью заменят покрытия, нанесенные при хромировании, так как они обеспечивают лучшую защиту от ударной нагрузки, износа и усталости при сопоставимом уровне защиты от коррозии.

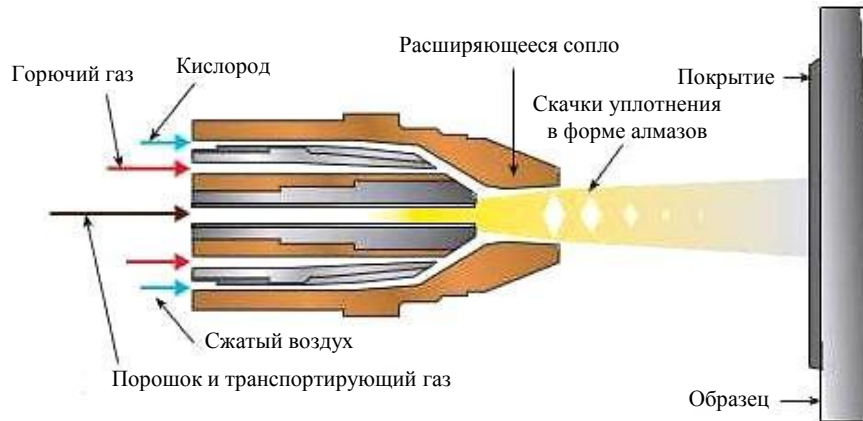


Рис. 3. Принципиальная схема высокоскоростного газопламенного напыления

### *Метод детонационного напыления*

Основными элементами оборудования для нанесения покрытий методом детонационного напыления являются камера сгорания и водоохлаждаемый ствол. В камеру подается ацетилен-кислородная смесь (в некоторых случаях возможна подача пропана и азота) в определенном соотношении. Через технологическое отверстие в стволе потоком азота подается определенное количество напыляемого порошка. С помощью электрической искры поджигается газовая смесь, а затем она взрывается (детонирует). Разогретые от ударной волны частицы разгоняются до скоростей  $>800$  м/с и нагреваются до температуры около  $1400\text{--}1700$  °С. При их попадании на поверхность, напыляемый порошок пластически деформируется, дополнительно нагреваясь до температур порядка  $4000$  °С. Периодичность повторения процесса – три-четыре выстрела в секунду. Принципиальная схема процесса детонационного напыления представлена на рис. 4.

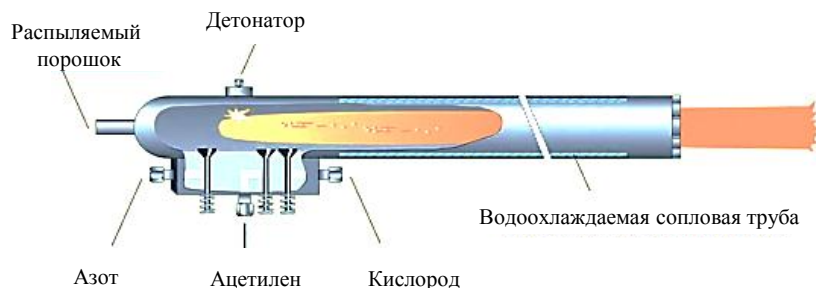


Рис. 4. Принципиальная схема процесса детонационного напыления

При детонационном напылении можно получать покрытия из любых материалов – тугоплавких соединений, оксидов и др. Так, для получения износостойких покрытий с целью восстановления деталей применяют оксид алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , самофлюсующиеся сплавы марок ПГ-СР, СНГН, ВСНГН (содержит 65 % WC + 35 % СНГН).

*Плазменное напыление*

При плазменном напылении между вольфрамовым катодом и медным водоохлаждаемым анодом (соплом) возбуждается электрическая дуга, нагревающая рабочий газ, в результате чего он истекает из сопла в виде плазменной струи. Порошковый материал, подаваемый в плазменную струю потоком транспортирующего газа (аргона или азота), с большой энергией ударяется о поверхность обрабатываемой детали. Благодаря высоким температурам при плазменном напылении можно наносить тугоплавкие материалы. Кроме того, регулирование температуры и скорости плазменной струи позволяет расширить номенклатуру наносимых материалов. Принципиальная схема процесса плазменного напыления представлена на рис. 5 [22].

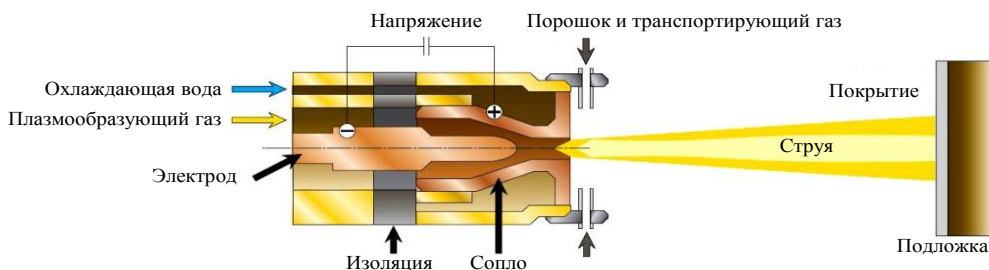


Рис. 5. Принципиальная схема процесса плазменного напыления

Плазменное напыление в зависимости от давления в камере напыления разделяют на атмосферное плазменное напыление, плазменное напыление при пониженном давлении и вакуумное плазменное напыление. Плазменными методами наносят широкую номенклатуру материалов: металлические сплавы систем Me–Cr–Al–Y, металлокерамические композиции типа MeC–NiCr/Co, покрытия на основе оксидов типа  $Al_2O_3/ZrO_2-Y_2O_3$ .

*Методы получения порошковых материалов для газотермического напыления*

Технологичность порошкового материала, применяемого при газотермическом напылении, влияет на качество получаемого покрытия, а также на коэффициент использования материала при напылении. При высоком показателе сферичности частицы порошка имеют невысокое значение угла разлета от оси потока. Таким образом, чем выше их скорость и температура при подлете к поверхности детали, тем плотнее получаемое покрытие. Форма частиц, их структура, а также пористость обуславливаются методом изготовления (рис. 6).

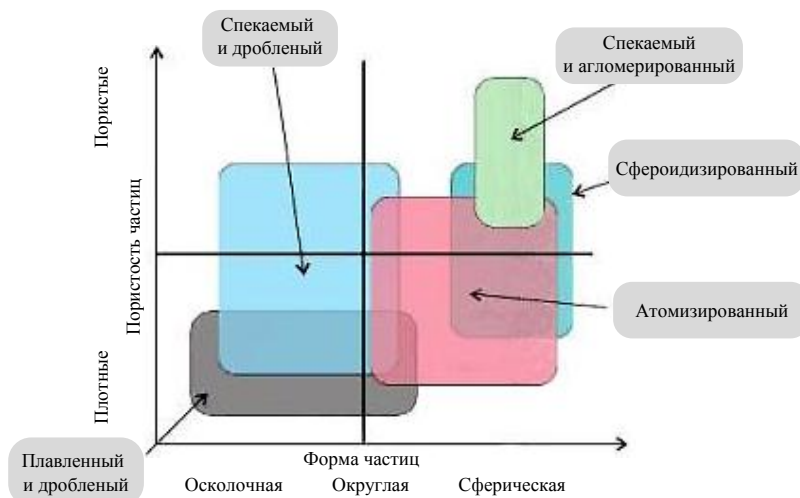


Рис. 6. Зависимость пористости и формы частиц от метода изготовления материалов

Существует несколько методов, широко применяемых в порошковой металлургии, для получения композиционных порошков систем WC-Co, WC-Co-Cr и Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr, используемых при газотермическом напылении. Для порошков на основе карбидов вольфрама и хрома применяют методы искрового плазменного спекания, распылительной сушки [23] и механического легирования.

### *Получение композиционных порошковых частиц методом искрового плазменного спекания*

Процесс получения композиционных порошков методом искрового плазменного спекания состоит в механическом перемешивании порошков, их искровом плазменном спекании до получения компактного материала и его механическом размоле. Таким образом получают композиционные частицы на основе карбида вольфрама (рис. 7). Плотность такого материала зависит от температуры и скорости спекания. Чем выше температура нагрева, тем плотнее спеченный материал и больше микротвердость.

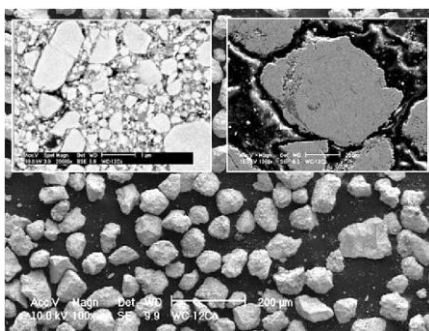


Рис. 7. Металлокерамические частицы, полученные в результате механического размола компактного материала состава WC-12Co [24]

Металлокерамические частицы, получаемые этим способом, имеют осколочную форму и равномерное распределение карбидов в объеме частицы.

Металлокерамические частицы на основе Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> также получают методом искрового плазменного спекания. Вид композиционных частиц Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr представлен на рис. 8.

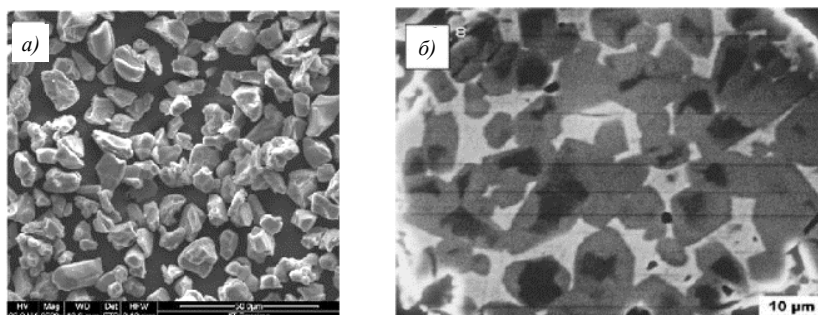


Рис. 8. Металлокерамические композиционные частицы, полученные в результате механического размола компактного материала системы Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr: а – морфология поверхности частиц [25]; б – поперечный шлиф частиц [26]

### *Метод получения металлокерамических порошков на основе карбидов вольфрама и хрома с использованием распылительной сушки*

Для данного метода применяются порошки с размером частиц <5 мкм, измельченные в планетарной мельнице. После чего происходит подготовка суспензии, которая содержит заданные массовые доли порошковых компонентов. В качестве рабочей

среды применяют раствор воды и поливинилового спирта. Далее происходит распыление суспензии с использованием форсунки, в результате чего за счет сил поверхностного натяжения образуются сферические частицы, которые подвергаются обработке горячим воздухом или инертным газом. В результате чего вода испаряется, происходит процесс сушки и удается получить металлокерамический порошок с частицами, имеющими высокую пористость – до 40 % (рис. 9).

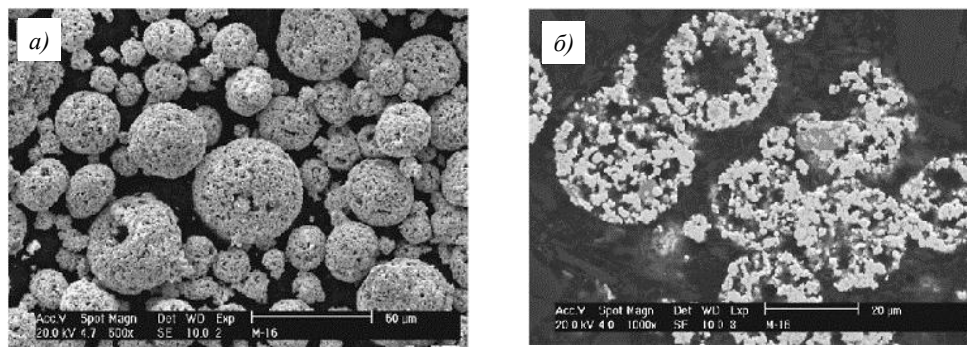


Рис. 9. Металлокерамические частицы состава WC–15 % ( $\text{Ni}_{23}\text{Cr}_{16}\text{Mo}_{1,0}\text{Fe}$ ), полученные в результате распылительной сушки [27]: *а* – морфология поверхности частиц; *б* – поперечный шлиф частиц

В результате распыления с одновременной сушкой подготовленной суспензии образуются металлокерамические частицы сферической формы, каркас которых сформирован карбидами (рис. 10).

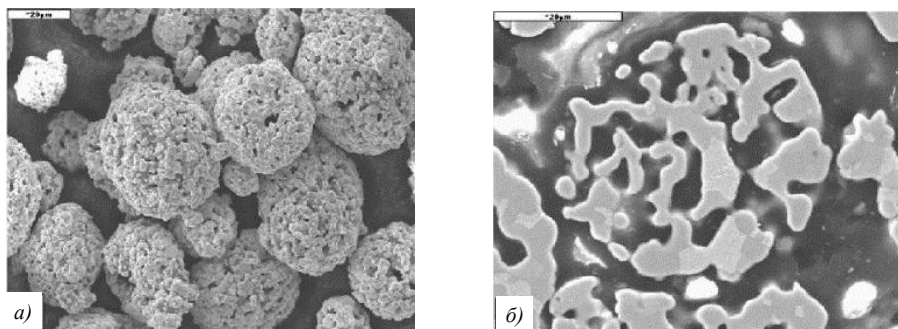


Рис. 10. Металлокерамические частицы состава 75 %  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ –25 % ( $\text{Ni}_{20}\text{Cr}$ ), полученные методом распылительной сушки [28]: *а* – морфология поверхности частиц; *б* – поперечный шлиф частиц

#### *Механическое легирование (механоактивация)*

В качестве альтернативы технологии распылительной сушки для получения композиционных порошков может быть рассмотрена технология механического легирования. Данный процесс заключается в смешивании элементов или лигатур (в виде порошка) с требуемой дисперсной фазой. Смешивание компонентов происходит в специальных высокоэнергетических шаровых мельницах – атриторах (рис. 11). В результате получают композиционные порошки, состоящие из однородной гомогенной смеси всех компонентов.

Механическое легирование представляет собой процесс повторяющегося межчастичного сваривания («холодная сварка») и расслаивания вблизи шаровидных поверхностей частиц при их интенсивном сталкивании до тех пор, пока достигается стабильное состояние (рис. 12).

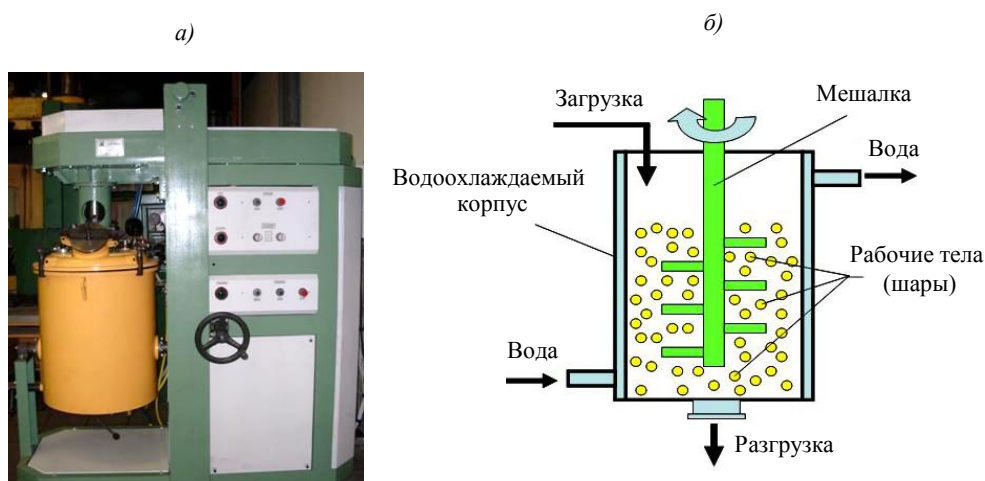


Рис. 11. Внешний вид атритора (а) и его принципиальная схема работы (б)

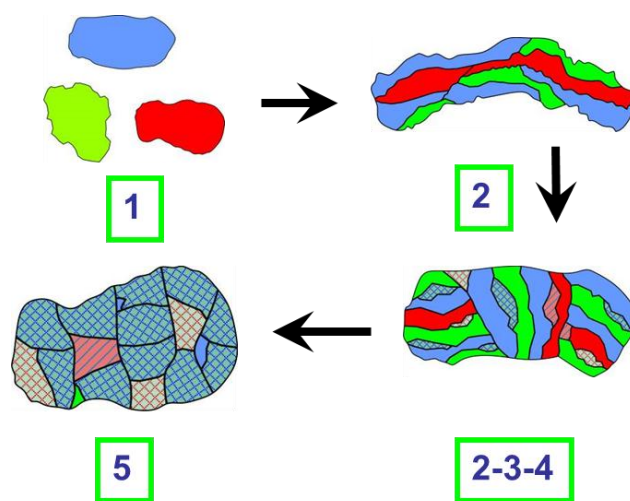


Рис. 12. Образование композиционных частиц из порошков исходных металлов: 1 – исходная смесь порошков металлов, лигатур; 2 – «холодная сварка» компонентов шихты на шаровидную поверхность частиц; 3 – перераспределение составляющих и гомогенизация; 4 – скол композиционных частиц с шаровидной поверхности; 5 – порошок сплава

На рис. 13 показана типичная структура композиционного порошка, полученного в процессе механического легирования.

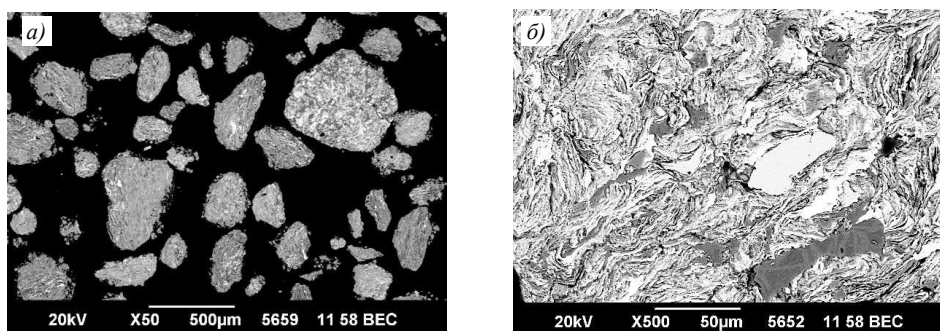


Рис. 13. Микроструктура композиционных гранул после обработки в атриторе: а – внешний вид; б – отдельная частица

Важным недостатком метода является то, что частицы композиционного порошка получают несферической формы. Указанный недостаток может быть устранен путем проведения плазменной сфероидизации.

### Результаты и обсуждение

Одной из важных характеристик порошка является размер частиц карбида вольфрама, используемых при изготовлении композиционных порошков. Например, известно, что при использовании наноразмерных частиц карбида вольфрама соответствующие покрытия обладают более высокой твердостью и износостойкостью [29–32]. Параметры нанесения покрытия также влияют на характеристики покрытий.

Геометрическая форма частиц порошка может влиять на микроструктуру получаемого покрытия. В работе [33] рассмотрены покрытия системы WC–Co–Cr, нанесенные из двух различных порошков с различной геометрической формой частиц, а также с исходным размером частиц карбида вольфрама в виде порошка с частицами осколочной (для покрытия А) и сферической формы (для покрытий В и В'). Покрытия наносили на низколегированную сталь методом высокоскоростного напыления. Влияние параметров процесса нанесения покрытия на микроструктуру и свойства покрытия изучено с использованием двух режимов – с высокоэнтальпийным (для покрытий А и В) и низкоэнтальпийным пламенем (для покрытия В'). Для сравнения рассмотрено покрытие, полученное гальваническим хромированием.

Параметры процесса для трех различных вариантов покрытий представлены в табл. 1. Перед нанесением покрытия образцы подвергали пескоструйной обработке.

Таблица 1

Параметры процесса высокоскоростного напыления

Покрытие	Режим	Расход O <sub>2</sub> , л/мин	Расход H <sub>2</sub> , л/мин	Расход N <sub>2</sub> , л/мин	Расход порошка, г/мин	Дистанция напыления, мм	Скорость перемещения, мм/с
А	1	214	344	635	38	230	1256
В		214	344	635	38	230	1256
В'	2	214	600	360	38	230	1256

Микроструктуры покрытий А, В и В' показаны на рис. 14.

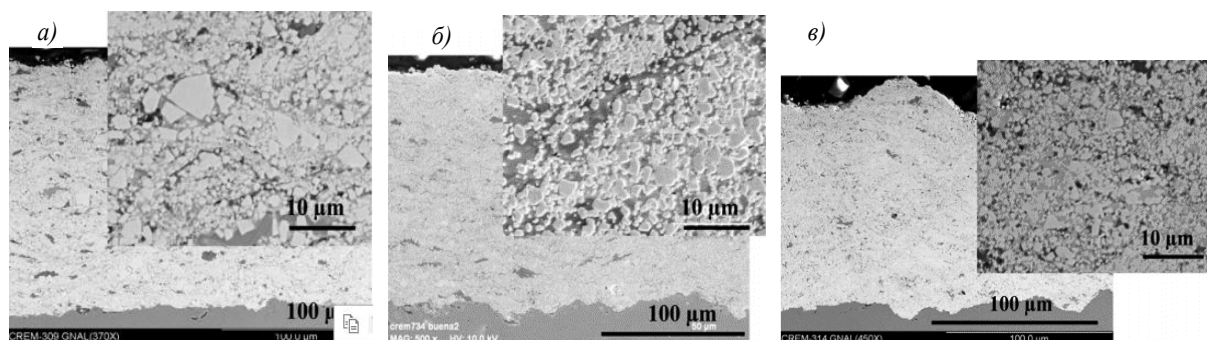


Рис. 14. СЭМ-изображения покрытий системы WC–Co–Cr, нанесенных с помощью высокоскоростного напыления: а – покрытие, полученное из порошка осколочной формы по режиму, обеспечивающему высокоэнтальпийное пламя; б – покрытие, полученное из порошка сферической формы по режиму, обеспечивающему высокоэнтальпийное пламя; в – покрытие, полученное из порошка сферической формы по режиму, обеспечивающему низкоэнтальпийное пламя

По полученным изображениям проведен анализ пористости и фазового состава покрытий. Соответствующие результаты представлены в табл. 2 и на рис. 15.

Таблица 2

Фазовый состав покрытий системы WC-Co-Cr

Форма порошка/пламя	Массовая доля, %			Пористость, %
	карбида кремния	твердого раствора Cr, W и C в Co	твердого раствора C в Cr	
Осколочная/высокоэнтальпийное	50,4	40,7	8,4	0,5
Сферическая/высокоэнтальпийное	59,6	35,1	5,3	0,1
Сферическая/низкоэнтальпийное	74,3	22,3	3,3	0,1

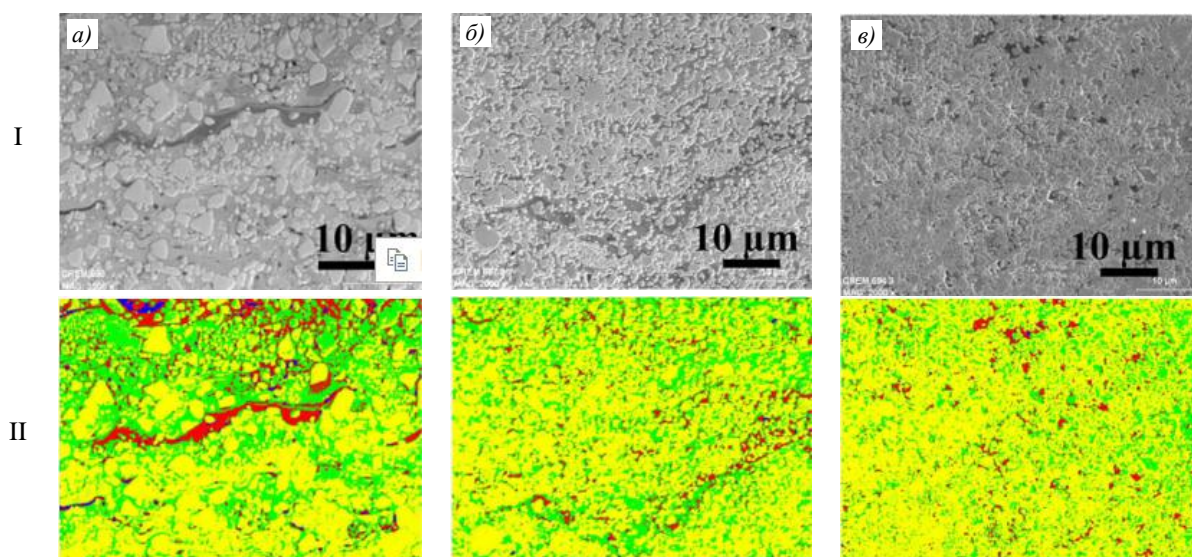


Рис. 15. Образцы, использованные для анализа фазового изображения покрытий системы WC-Co-Cr, нанесенных методом высокоскоростного напыления: *a* – покрытие, полученное из порошка осколочной формы по режиму, обеспечивающему высокоэнтальпийное пламя; *б* – покрытие, полученное из порошка сферической формы по режиму, обеспечивающему высокоэнтальпийное пламя; *в* – покрытие, полученное из порошка сферической формы по режиму, обеспечивающему низкоэнтальпийное пламя

На рис. 15 различимы четыре типа фаз:

- 1 – на I – в виде светлых частиц карбида вольфрама с угловатыми краями и, следовательно, не расплавленных во время нанесения; на II – желтый цвет;
- 2 – на I – серая зона в виде твердого раствора Cr, W и C в Co; на II – зеленый цвет;
- 3 – на I – темные крупные «агломераты» также внутри матрицы, твердый раствор C в Cr; на II – красный цвет;
- 4 – на I, *a* – черные поры; на II, *a* – синий цвет.

В результате энергодисперсионного анализа обнаружено значительное количество углерода, в связи с чем можно утверждать, что в результате напыления не произошло диссоциации карбида вольфрама с образованием летучих соединений углерода. Пористость покрытий во всех случаях незначительна, однако наименьшими значениями пористости обладают покрытия, полученных из порошка сферической формы с более мелкими частицами исходных карбидов. Относительное содержание карбида вольфрама в покрытии соответствует ряду: осколочная форма < сферическая форма/высокоэнтальпийное пламя < сферическая форма/низкоэнтальпийное пламя, несмотря на идентичное содержание до процесса напыления.

На рис. 16 для сравнения показана микроструктура гальванического хромового покрытия, используемого в качестве эталона. Наблюдается сетка мелких трещин (в ряде случаев сквозных), степень пористости составляет 0,6 %.

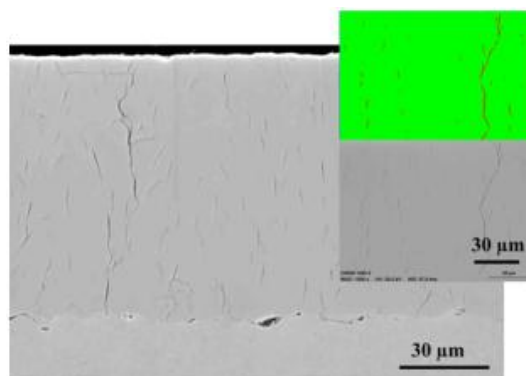


Рис. 16. СЭМ-изображения поперечного сечения образца с гальваническим хромовым покрытием

Поверхности материалов с покрытиями на основе карбидов вольфрама и хрома, полученными методом высокоскоростного напыления, обладают высокими твердостью (>70 HRC) и адгезией (>80 МПа). Эти покрытия могут быть получены толщиной до 1000 мкм, не приводят к наводороживанию металла и образованию флокенов в сталях, обладают химической стойкостью во многих агрессивных средах.

Высокоскоростное напыление обеспечивает также возможность нанесения защитных покрытий на титан и металлокерамические материалы. Однако к недостаткам данного метода следует отнести невозможность нанесения покрытия на внутреннюю поверхность деталей с диаметром отверстия <100 мм. Важно отметить, что любое газотермическое покрытие после нанесения требует финишной механической обработки (шлифовки) для обеспечения заданного параметра шероховатости поверхности. Сравнительные характеристики газотермического износостойкого покрытия на основе карбида вольфрама и гальванического хромового покрытия представлены в табл. 3.

Таблица 3

**Характеристики покрытий**

Свойства	Значения свойств для	
	газотермического покрытия на основе карбида вольфрама	гальванического хромового покрытия
Твердость HRC	≥70	60–70
Прочность сцепления, МПа	≥80	41
Пористость, %	≤1	–
Толщина покрытия, мм	≥0,08	≤0,13
Шероховатость $R_a$	≤4	≤4
Коррозионная стойкость, ч	720	55
Жаростойкость, °С	500	400

Как видно из данных табл. 3, значение твердости покрытия на основе карбида вольфрама превышает твердость гальванического хромового покрытия (≥70 и 60–70 HRC соответственно). Значения микротвердости по Виккерсу газотермических покрытий на основе карбидов вольфрама и хрома составляют 1050 и 750–850 соответственно.

### Заключения

В настоящее время наблюдается тенденция по применению альтернативных гальваническому хромированию технологий нанесения защитных и упрочняющих покрытий. Ведущие производители авиационной техники применяют методы газотермического напыления для обеспечения требуемых характеристик износо- и коррозионной стойкости поверхности защищаемых деталей. Основными материалами для нанесения износо-коррозионностойких покрытий являются композиционные металлокерамические порошковые материалы систем WC-Co, WC-Co-Cr и Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr. Из всего разнообразия методов газотермического напыления наиболее распространенным является метод высокоскоростного напыления, так как по совокупности характеристик производительности и свойств получаемых покрытий превосходит покрытия, получаемые методами газопламенного, плазменного и детонационного напыления.

В обзоре рассмотрены основные методы получения композиционных порошковых материалов для нанесения покрытий. Выявлены основные характеристики порошковых материалов, влияющие на качество получаемых покрытий: форма частиц и равномерность распределения карбидов в частице. Наиболее распространенным способом получения композиционных металлокерамических порошков для промышленного применения является распылительная сушка – за счет сферичности получаемых частиц, равномерности распределения карбидов внутри одной частицы и высокой производительности.

Рассмотрены также покрытия, полученные методом высокоскоростного напыления из частиц осколочной и сферической формы при высоко- и низкоэнталийном тепловом потоке. В результате показано, что наилучшими характеристиками обладает покрытие, полученное из сферического порошка при нанесении в низкоэнталийном тепловом потоке.

В целом, несмотря на некоторые технологические недостатки, методы газотермического напыления (особенно высокоскоростного напыления) покрытий на основе систем WC-Co, WC-Co-Cr и Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr в настоящее время широко применяются при нанесении износо-коррозионностойких покрытий взамен гальванического хромирования и обладают более высокими эксплуатационными свойствами.

Дальнейшее развитие метода газотермического напыления связано с совершенствованием способов изготовления материалов для нанесения покрытий (композиционных металлокерамических порошков) и применением плазменной сфероидизации для порошков осколочной формы, полученных механическим легированием (механоактивацией).

### Список источников

1. Батиенков Р.В., Бурковская Н.П., Большакова А.Н., Худнев А.А. Высокотемпературные композиционные материалы с металлической матрицей (обзор) // Труды ВИАМ. 2020. № 6–7 (89). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.06.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-67-45-61.
2. Matthews S., James B., Hyland M. High temperature erosion–oxidation of Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr thermal spray coatings under simulated turbine conditions // Corrosion Science. 2013. No. 70. P. 203–211.
3. Kaur M., Singh H., Prakash S. Surface engineering analysis of detonation-gun sprayed Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr coating under high-temperature oxidation and oxidation–erosion environments // Thermal Spray Technology. 2008. No. 18 (4). P. 619–631.
4. Barbezat G., Nicoll A.R., Sickinger A. Erosion and scuffing resistance of carbide and oxide ceramic thermal sprayed coatings for different applications // Wear. 1993. No. 162–164. P. 529–537.
5. Thakur L., Arora N., Jayaganthan R., Sood R. An investigation on erosion behavior of HVOF sprayed WC-CoCr coatings // Applied Surface Science. 2011. No. 258. P. 1225–1234.
6. Kamal S., Jayaganthan R., Prakash S. Evaluation of cyclic hot corrosion behaviour of detonation gun sprayed Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-25 % NiCr coatings on nickel- and iron-base superalloys // Surface and Coatings Technology. 2009. No. 203. P. 1004–1013.
7. Matthews S., James B., Hyland M. The role of microstructure in the high temperature oxidation mechanism of Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr composite coatings // Corrosion Science. 2009. No. 51. P. 1172–1180.

8. Wirojanupatump S., Shipway P.H., McCartney D.G. The influence of HVOF powder feedstock characteristics on the abrasive wear behaviour of  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ -NiCr coatings // *Wear*. 2001. No. 249. P. 829–837.
9. Sidhu T.S., Prakash S., Agrawal R.D. Hot corrosion studies of HVOF sprayed  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ -NiCr and Ni-20Cr coatings on nickel-based superalloy at 900 °C // *Surface and Coatings Technology*. 2006. No. 201. P. 792–800.
10. Murthy J.K.N., Venkataraman B. Abrasive wear behavior of WC-CoCr and  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ -20(NiCr) deposited by HVOF and detonation spray processes // *Surface and Coatings Technology*. 2006. No. 200. P. 2642–2652.
11. He J.H., Ice M., Schoenung M. et al. Thermal stability of nanostructured  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ -NiCr coatings // *Thermal Spray Technology*. 2001. No. 10. P. 293–300.
12. Stein K.J., Schorr B.S., Marder A.R. Erosion of thermal spray MCr- $\text{Cr}_3\text{C}_2$  cermet coatings // *Wear*. 1999. No. 224. P. 153–159.
13. Li C.J., Wang Y.Y., Ohmori G.J.A., Khor K.A. Effect of solid carbide particle size on deposition behavior, microstructure and wear performance of HVOF cermet coatings // *Materials Science and Technology* 2004. No. 20. P.1087–1096.
14. Sidhu T.S., Prakash S., Agrawal R.D. Characterizations and Hot corrosion resistance of  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ -NiCr coatings on nickel-based superalloy in aggressive environment // *Thermal Spray Technology*. 2006. No. 15 (4). P. 811–816.
15. Guilemany J.M., Fernandez J., Delgado J. et al. Effects of thickness coatings on the electrochemical behavior of thermal spray  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ -NiCr coatings // *Surface and Coatings Technology*. 2002. No. 153. P. 107–113.
16. Chatha S.S., Sidhu H.S., Sidhu B.S. High temperature hot corrosion behavior of NiCr and  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ -NiCr coatings on T91 boiler steel in an aggressive environment at 750 °C // *Surface and Coatings Technology*. 2012. No. 206. P. 3839–3850.
17. Kamal S., Jayaganthan R., Prakash S. High temperature oxidation studies of detonation-gun-sprayed  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ -NiCr coating on Fe- and Ni-based superalloys in air under cyclic condition at 900 °C // *Journal of Alloys and Compounds*. 2009. No. 472. P. 378–389.
18. Sidhu T.S., Prakash S., Agrawal R.D. Studies of the metallurgical and mechanical properties of high velocity oxy-fuel sprayed satellite-6 coating on Ni and Fe based superalloys // *Surface and Coatings Technology*. 2006. No. 201. P. 273–281.
19. Shuklaa V.N., Jayaganthanb R., Tewarib V.K. Degradation Behavior of HVOF-Sprayed  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ -25 % NiCr Cermet Coatings Exposed to High Temperature // *Materials Today: Proceedings*. 2015. Vol. 2. Issue 4. P. 1805–1813.
20. Каблов Е.Н., Лукина Е.А., Заводов А.В., Ефимочкин И.Ю. Формирование структуры твердых сплавов на основе системы WC-Co с субмикронным зерном в присутствии ингибирующих добавок // *Труды ВИАМ*. 2020. № 4–5 (88). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.06.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-45-89-99.
21. Козлов И.А., Лещев К.А., Никифоров А.А., Демин С.А. Холодное газодинамическое напыление покрытий (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2020. № 8 (90). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 21.06.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-77-93.
22. Яцюк И.В., Доронин О.Н., Куко И.С. Вторичная переработка литых трубных катодов при получении металлопорошковой композиции для газотермического напыления покрытий // *Труды ВИАМ*. 2021. № 2 (96). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 21.06.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-2-81-87.
23. Чесноков А.Е. Влияние высокоэнергетических воздействий на микроструктуру СВС металлокерамических порошков и газотермических покрытий «карбид титана–нихром»: дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск: Сибир. федер. ун-т, 2016. 118 с.
24. Picas J.A., Xiong Y., Punset M. Microstructure and wear resistance of WC-Co by three consolidation processing techniques // *Journal of Refractory Metals & Hard Materials*. 2009. No. 27. P. 344–349.
25. Rakesh B. Development of erosion corrosion resistant HVOF Sprayed  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ -NiCr coatings for boiler tube steels operating at elevated temperatures. Punjabi University, 2013. 252 p.
26. Toma D., Brandl W., Marginean G. Wear and corrosion behaviors of thermally sprayed cermet coatings // *Surface and Coatings Technology*. 2001. Vol. 138. No. 2–3. P. 149–158.
27. Zimakov S., Kulu P., Goljandin D. et al. Microstructured cermet powders for HVOF spraying // *Welding & Powder Metallurgy*. 2005. Vol. 1. P. 1–8.

28. Żórawski W., Skrzypek S., Trpčevska J. Tribological Properties of Hypersonically Sprayed Carbide Coatings // Faculty of Mechanical Engineering, FME Transactions. 2008. Vol. 36. P. 81–86.
29. Jia K., Fisher T.E. Abrasion Resistance of Nanostructured and Conventional Cemented Carbides // Wear. 1996. No. 200. P. 206–214.
30. Jia K., Fisher T.E. Sliding Wear of Conventional and Nanostructured Cemented Carbides // Wear. 1997. No. 203–204. P. 310–318.
31. Cho T.Y., Yoon J.H., Kim K.S. et al. A Study on HVOF Coatings of Micron and Nano WC–Co Powders // Surface and Coatings Technology. 2008. No. 202. P. 5556–5559.
32. Guilemany J.M., Dosta S., Miguel J.R. The Enhancement on the Properties of WC–Co HVOF Coatings Through the Use of Nanostructured and Microstructured Feedstock Powders // Surface and Coatings Technology. 2006. No. 201. P. 1180–1190.
33. Agüero A., Camo'n F., Garcí'a de Blas J. et al. HVOF-Deposited WCCoCr as Replacement for Hard Cr in Landing Gear Actuators // Thermal Spray Technology. 2011. Vol. 20 (6). P. 1292–1309.

### References

1. Batienvkov R.V., Burkovskaya N.P., Bolshakova A.N., Khudnev A.A. High temperature metal matrix composite materials (review). *Trudy VIAM*, 2020, no. 6–7 (89), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: June 01, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-67-45-61.
2. Matthews S., James B., Hyland M. High temperature erosion–oxidation of Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>–NiCr thermal spray coatings under simulated turbine conditions. *Corrosion Science*, 2013, no. 70, pp. 203–211.
3. Kaur M., Singh H., Prakash S. Surface engineering analysis of detonation-gun sprayed Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>–NiCr coating under high-temperature oxidation and oxidation–erosion environments. *Thermal Spray Technology*, 2008, no. 18 (4), pp. 619–631.
4. Barbezat G., Nicoll A.R., Sickinger A. Erosion and scuffing resistance of carbide and oxide ceramic thermal sprayed coatings for different applications. *Wear*, 1993, no. 162–164, pp. 529–537.
5. Thakur L., Arora N., Jayaganthan R., Sood R. An investigation on erosion behavior of HVOF sprayed WC–CoCr coatings. *Applied Surface Science*, 2011, no. 258, pp. 1225–1234.
6. Kamal S., Jayaganthan R., Prakash S. Evaluation of cyclic hot corrosion behaviour of detonation gun sprayed Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>–25 % NiCr coatings on nickel- and iron-base superalloys. *Surface and Coatings Technology*, 2009, no. 203, pp. 1004–1013.
7. Matthews S., James B., Hyland M. The role of microstructure in the high temperature oxidation mechanism of Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>–NiCr composite coatings. *Corrosion Science*, 2009, no. 51, pp. 1172–1180.
8. Wirojanupatump S., Shipway P.H., McCartney D.G. The influence of HVOF powder feedstock characteristics on the abrasive wear behaviour of Cr<sub>x</sub>C<sub>y</sub>–NiCr coatings. *Wear*, 2001, no. 249, pp. 829–837.
9. Sidhu T.S., Prakash S., Agrawal R.D. Hot corrosion studies of HVOF sprayed Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>–NiCr and Ni–20Cr coatings on nickel-based superalloy at 900 °C. *Surface and Coatings Technology*, 2006, no. 201, pp. 792–800.
10. Murthy J.K.N., Venkataraman B. Abrasive wear behavior of WC–CoCr and Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>–20(NiCr) deposited by HVOF and detonation spray processes. *Surface and Coatings Technology*, 2006, no. 200, pp. 2642–2652.
11. He J.H., Ice M., Schoenung M. et al. Thermal stability of nanostructured Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>–NiCr coatings. *Thermal Spray Technology*, 2001, no. 10, pp. 293–300.
12. Stein K.J., Schorr B.S., Marder A.R. Erosion of thermal spray MCr–Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> cermet coatings. *Wear*, 1999, no. 224, pp. 153–159.
13. Li C.J., Wang Y.Y., Ohmori G.J.A., Khor K.A. Effect of solid carbide particle size on deposition behavior, microstructure and wear performance of HVOF cermet coatings. *Materials Science and Technology*, 2004, no. 20, pp. 1087–1096.
14. Sidhu T.S., Prakash S., Agrawal R.D. Characterizations and Hot corrosion resistance of Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>–NiCr coatings on nickel-based superalloy in aggressive environment. *Thermal Spray Technology*, 2006, no. 15 (4), pp. 811–816.
15. Guilemany J.M., Fernandez J., Delgado J. et al. Effects of thickness coatings on the electrochemical behavior of thermal spray Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>–NiCr coatings. *Surface and Coatings Technology*, 2002, no. 153, pp. 107–113.
16. Chatha S.S., Sidhu H.S., Sidhu B.S. High temperature hot corrosion behavior of NiCr and Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>–NiCr coatings on T91 boiler steel in an aggressive environment at 750 °C. *Surface and Coatings Technology*, 2012, no. 206, pp. 3839–3850.

17. Kamal S., Jayaganthan R., Prakash S. High temperature oxidation studies of detonation-gun-sprayed Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr coating on Fe- and Ni-based superalloys in air under cyclic condition at 900 °C. *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, no. 472, pp. 378–389.
18. Sidhu T.S., Prakash S., Agrawal R.D. Studies of the metallurgical and mechanical properties of high velocity oxy-fuel sprayed satellite-6 coating on Ni and Fe based superalloys. *Surface and Coatings Technology*, 2006, no. 201, pp. 273–281.
19. Shuklaa V.N., Jayaganthanb R., Tewarib V.K. Degradation Behavior of HVOF-Sprayed Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-25 % NiCr Cermet Coatings Exposed to High Temperature. *Materials Today: Proceedings*, 2015, vol. 2, is. 4, pp. 1805–1813.
20. Kablov E.N., Lukina E.A., Zavodov A.V., Efimochkin I.Yu. The formation of structure in ultrafine WC-Co carbide material in the presence of inhibitory additives. *Trudy VIAM*, 2020, no. 4–5 (88), paper no. 10. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: June 16, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-45-89-99.
21. Kozlov I.A., Leshchev K.A., Nikiforov A.A., Demin S.A. Cold spray coatings (review). *Trudy VIAM*, 2020, no. 8 (90), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: June 21, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-77-93.
22. Iatsyuk I.V., Doronin O.N., Kuko I.S. Secondary processing of cast tube cathodes when obtaining a metal powder composition for the gas-thermal spray of coatings. *Trudy VIAM*, 2021, no. 2 (96), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: June 21, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-2-81-87.
23. Chesnokov A.E. *Influence of high-energy impacts on the microstructure of SHS metal-ceramic powders and gas-thermal coatings "titanium carbide-nichrome"*: thesis, Cand. Sc. (Tech.). Novosibirsk: Siberian Federal University, 2016, 118 p.
24. Picas J.A., Xiong Y., Punset M. Microstructure and wear resistance of WC-Co by three consolidation processing techniques. *Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 2009, no. 27, pp. 344–349.
25. Rakesh B. *Development of erosion corrosion resistant HVOF Sprayed Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr coatings for boiler tube steels operating at elevated temperatures*. Punjabi University, 2013, 252 p.
26. Toma D., Brandl W., Marginean G. Wear and corrosion behaviors of thermally sprayed cermet coatings. *Surface and Coatings Technology*, 2001, vol. 138, no. 2–3, pp. 149–158.
27. Zimakov S., Kulu P., Goljandin D. et al. Microstructured cermet powders for HVOF spraying. *Welding & Powder Metallurgy*, 2005, vol. 1, pp. 1–8.
28. Żórawski W., Skrzypek S., Trpčevska J. Tribological Properties of Hypersonically Sprayed Carbide Coatings. *Faculty of Mechanical Engineering, FME Transactions*, 2008, vol. 36, pp. 81–86.
29. Jia K., Fisher T.E. Abrasion Resistance of Nanostructured and Conventional Cemented Carbides. *Wear*, 1996, no. 200, pp. 206–214.
30. Jia K., Fisher T.E. Sliding Wear of Conventional and Nanostructured Cemented Carbides. *Wear*, 1997, no. 203–204, pp. 310–318.
31. Cho T.Y., Yoon J.H., Kim K.S. et al. A Study on HVOF Coatings of Micron and Nano WC-Co Powders. *Surface and Coatings Technology*, 2008, no. 202, pp. 5556–5559.
32. Guilemany J.M., Dosta S., Miguel J.R. The Enhancement on the Properties of WC-Co HVOF Coatings Through the Use of Nanostructured and Microstructured Feedstock Powders. *Surface and Coatings Technology*, 2006, no. 201, pp. 1180–1190.
33. Agüero A., Camo'n F., Garcí'a de Blas J. et al. HVOF-Deposited WCCoCr as Replacement for Hard Cr in Landing Gear Actuators. *Thermal Spray Technology*, 2011, vol. 20 (6), pp. 1292–1309.

**Информация об авторах**

**Дружнова Яна Сергеевна**, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Information about the authors**

**Yana S. Druzhnova**, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

Статья поступила в редакцию 18.07.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 20.07.2022.  
The article was submitted 18.07.2022; approved and accepted for publication after reviewing 20.07.2022.