

## Оригинальная статья / Original article

УДК 621.762.03

<https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-3-61-73>

## Нанесение покрытий из карбидосталей на стальную основу методом плазменного напыления

В. К. Нарва<sup>1</sup>, Ж. В. Еремеева<sup>1,2</sup> ✉, В. В. Гомжин<sup>2</sup>, Н. И. Волгина<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»  
Ленинский проспект, д. 4, г. Москва 119049, Российская Федерация

<sup>2</sup> Московский политехнический университет  
ул. Большая Семёновская, д. 38, г. Москва 107023, Российская Федерация

✉ e-mail: eremeeva-shanna@yandex.ru

### Резюме

**Цель.** Установить возможность использования метода плазменного напыления покрытий из карбидосталей на стальную основу с целью повышения износостойкости, определить режимы, исследовать свойства полученных покрытий.

**Методы.** Карбидосталь получали смешиванием компонентов стали и карбида титана в шаровой твердо-сплавной мельнице в спирте (0,25 л на 1 кг смеси) в течение 48 часов при соотношении шары: смесь = 3:1. Режим смешивания установлен ранее проведенными работами на кафедре. После смешивания шихту сушили при 80–100°C в сушильном шкафу. Грансостав определяли на универсальном лазерном приборе FRITSCHE ANALYSETTE 22 MicroTec plus, оснащённом блоком диспергирования в жидкой среде. Текучесть измеряли по ГОСТ 20899-98. Насыпная плотность измерялась по ГОСТ 19440-94.

**Результаты.** Исследован процесс плазменного напыления покрытий из карбидосталей на основу из углеродистой стали 45. Установлена возможность использования метода плазменного напыления покрытий из карбидосталей разных марок на стальную основу с целью повышения износостойкости. Исследован способ подготовки порошковых смесей методом оплавления в атмосфере водорода, обеспечивающий достаточную текучесть карбидосталей при формировании покрытий. Установлены оптимальные режимы нанесения покрытий.

**Заключение.** Экспериментальные исследования показали не только возможность практического применения, но и положительный результат. Установлена высокая прочность сцепления покрытий с основой после вакуумного спекания (для карбидосталей состава 10% TiC и стали X6B3M – 116 МПа, для карбидостали состава 40% TiC и стали X12M – 220 МПа).

**Ключевые слова:** нанесение покрытий; карбидостали; износостойкость; сталь; порошковые смеси; напыление; вакуумная металлзация.

**Конфликт интересов:** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Для цитирования:** Нанесение покрытий из карбидосталей на стальную основу методом плазменного напыления / В. К. Нарва, Ж. В. Еремеева, В. В. Гомжин, Н. И. Волгина // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2023. Т. 13, № 3. С. 61–73. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-3-61-73>

Поступила в редакцию 26.07.2023

Подписана в печать 21.08.2023

Опубликована 29.09.2023

\*\*\*

© Нарва В. К., Еремеева Ж. В., Гомжин В. В., Волгина Н. И., 2023

## Coating of Carbide Steels on a Steel Base by Plasma Spraying

Valentina K. Narva<sup>1</sup>, Zhanna V. Ereemeeva<sup>1,2</sup> ✉, Vladimir V. Gomzhin<sup>2</sup>,  
Natalia I. Volgina<sup>2</sup>

<sup>1</sup> National Research Technological University MISiS  
4 Leninsky prospect Moscow 119049, Russian Federation

<sup>2</sup> Moscow Polytechnic University  
38 Str. Bolshaya Semyonovskaya, Moscow 107023, Russian Federation

✉ e-mail: eremeeva-shanna@yandex.ru

### Abstract

**Purpose.** Establish the possibility of using the method of plasma spraying of coatings from carbide steels on the steel base in order to increase wear resistance, to identify modes of spraying and to investigate the properties of the resulting coatings.

**Methods.** Carbide steel has been obtained by mixing the components of steel and titanium carbide in a hard-alloy ball mill in alcohol (0.25 l per 1 kg of mixture) for 48 hours with a ball and mixture ratio of 3 to 1. The mixing mode was established during the previous work at the department. After mixing, it was dried at 80-100 °C in the drying chamber. The granulometric composition was determined on the FRITSCHE ANALYSETTE 22 MicroTec plus universal laser device, equipped with a liquid dispersion unit. Fluidity measured according to GOST 20899-98. Bulk density was measured according to GOST 19440-94.

**Results.** The analysis and classification of methods of surface treatment of parts and tools of various purposes was carried out, the most common and promising methods for restoration of products were identified, which include methods of spray coating, vacuum metallization and electrophoretic deposition. The process of plasma spraying of coatings from carbide steels on the basis of carbon steel 45 was studied. The possibility of using the method of plasma spraying of coatings from different types of carbide steels on the steel base in order to increase wear resistance was established. The method of preparation of powder mixture by melting in the hydrogen atmosphere which ensures sufficient fluidity of carbide steels during the formation of coatings was studied. Optimal modes of coatings were established.

**Conclusion.** The conducted analysis and classification of methods of surface treatment of parts revealed the most common and promising methods, among which the process of plasma spraying of coatings was noted. Experimental studies have shown not only the possibility of practical application, but also a positive result. The high strength of adhesion of coatings with the base metal after vacuum sintering (For 10% TiC carbide steels and base of Cr6W3Mo steel - 116 MPa, for the 40% TiC carbide steels and base of Cr12Mo steel - 220 MPa) has been established.

**Keywords:** coatings; carbide steels; wear resistance; steel; powdered mixtures; spraying, vacuum metallization.

**Conflict of interest:** The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

**For citation:** Narva V. K., Ereemeeva Z. V., Gomzhin V. V., Volgina N. I. Coating of Carbide Steels on a Steel Base by Plasma Spraying. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2023; 13(3): 61–73. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-3-61-73>

Received 26.07.2023

Accepted 21.08.2023

Published 29.09.2023

\*\*\*

### Введение

Создание новых труднообрабатываемых конструкционных материалов, интенсификация производственных процессов требуют разработки новых и совершенствования существующих износостойких материалов, способных работать в условиях повышенных контактных давлений, интенсивного абразивного и адгезионного

износов при комнатной и повышенной температурах.

Решить проблему обеспечения производства материалами с повышенными свойствами путем применения сложнолегированных сталей не удастся в связи с их более низкими физико-механическими свойствами по сравнению с композиционными материалами и дефицитностью многих легирующих добавок. Изготовление сложных деталей машин и механизмов из

износостойких материалов методом порошковой металлургии является сложным, а в ряде случаев и невозможным.

Разрушение деталей машин, инструмента и других изделий в подавляющем большинстве начинается с поверхности, и именно к поверхностным слоям относятся перечисленные выше требования. В связи с этим не всегда необходимо объемное легирование сталей для обеспечения требуемых свойств. Проблему можно решить путем покрытия сталей различными износостойкими материалами. Применение таких покрытий, с одной стороны, позволяет многократно повысить износостойкость деталей, с другой – применить для нее менее дефицитную и дешевую легированную сталь. Нанесение покрытий решает проблему восстановления изношенных деталей, что позволяет увеличить срок их службы.

Наибольшей износостойкостью из всех современных композиционных материалов характеризуются твердые сплавы. Однако применение материалов с покрытиями из твердых сплавов ограничено из-за их высокой стоимости и дефицитности, детали с твердосплавными покрытиями тяжело обрабатываются. В связи с разницей в температурных коэффициентах линейного расширения твердых сплавов и сталей термообработка детали с покрытием приводит к появлению внутренних напряжений в зоне контакта, что резко ухудшает прочность сцепления.

Перечисленные недостатки можно исключить применением слоев из карбидосталей, по уровню свойств занимающих промежуточное место между сталями и твердыми сплавами, имеющих высокую твердость и износостойкость. Эти материалы включают в себя карбид титана с массовой долей 20–70%. Связкой служат различные марки сталей, выбранные из условий работы материала. Благодаря наличию стали в материале он может быть подвергнут термической обработке: отжигу, закалке, отпуску, благодаря которой в

отожженном состоянии за счет значительного снижения твердости (38–42 HRC) он может быть механически обработан, а последующей закалкой ему можно сообщить высокую твердость (70–72 HRC) и износостойкость. В отличие от твердых сплавов, плотность которых 14–16 г/см<sup>3</sup>, карбидостали обладают более низкой плотностью 6–6,5 г/см<sup>3</sup>, что является большим преимуществом при использовании их в качестве конструкционного материала. Сочетанием карбида титана и инструментальных сталей в качестве связки можно получать различные марки материалов с соответствующими свойствами. Нанесение покрытий из карбидосталей на стальную основу более перспективно ввиду близости их температурных коэффициентов линейного расширения, а также потому, что карбидостали дешевле и доступнее.

К сожалению, в настоящее время нет единых рекомендаций, позволяющих наносить покрытия различных составов на стальную основу, поэтому в каждом конкретном случае приходится подбирать способ и условия нанесения для каждого материала. Вопрос усугубляется и экономической стороной, а именно какой из способов наиболее эффективен с точки зрения производственной практики. При нанесении покрытий приходится также ориентироваться и на специфические требования, предъявляемые к покрытиям: прочность сцепления с основой, создание покрытий разной толщины на детали сложной формы, крупногабаритных размеров и т. д. Поэтому очень важен выбор способа нанесения покрытий.

Существуют разнообразные способы поверхностной обработки, которые можно разделить на два больших класса: способы, формирующие слои на поверхностях изношенных деталей из материалов, обеспечивающих достижение высокого уровня необходимых свойств, и способы, позволяющие придать необходимый комплекс свойств материалу, из которого изготовлены обрабатываемые инструменты и детали. Последние способы

не могут быть использованы для восстановления изношенных поверхностей изделий до нужных геометрических размеров и форм.

По механизму воздействия на обрабатываемый материал при его поверхностной обработке все способы условно можно разделить на группы [1]:

- химические и электрохимические способы;
- физические способы;
- механические способы.

Целесообразно выделить отдельной группой физико-механические способы, типичными представителями которых являются электроконтактное нанесение порошковых материалов и способ лазерной обработки поверхностей.

Каждый из выделенных в группы способ можно классифицировать, в свою очередь подразделяя по схемам и технологическим особенностям поверхностной обработки.

Из всего многообразия технологических процессов и схем, позволяющих создавать высокие уровни необходимых поверхностных свойств, остановимся на наиболее перспективных способах, имеющих достаточно широкое промышленное применение – на способах нанесения покрытий из порошковых материалов. Эти способы позволяют получить такие свойства поверхности, которые нецелесообразно или невозможно достигнуть другими методами. В первую очередь это покрытие из тугоплавких материалов, сложеннолегированных жаропрочных сплавов, псевдосплавов, композиций из металлов с неметаллами, пористые покрытия и т. д.

К наиболее распространенным способам нанесения покрытий из порошковых материалов относятся технологии напыления газотермическими и вакуумными конденсационными методами, позволяющими изготавливать изделия с широким диапазоном свойств поверхности.

Процесс напыления представляет собой способ нанесения покрытия на по-

верхность деталей и инструмента с помощью высокотемпературной скоростной струи, содержащей частицы порошка или капли расплавленного металла, осаждающихся на основном материале при ударном столкновении с его поверхностью [1].

В этой же работе было предложено классифицировать схемы напыления по применяемому источнику тепловой энергии, выделяя два основных способа:

1) газоплазменное напыление, при котором используется теплота, выделяющаяся при сгорании смеси горючего газа с кислородом;

2) электрическое напыление, основанное на использовании теплоты, выделяющейся при горении электрической дуги.

В работе [2] электрическое напыление представлено в виде электродугового напыления, где используется энергия электрической дуги, расплавляющая наносимый материал, и плазменного напыления, где энергия электрической дуги ионизирует плазмообразующий газ, который, в свою очередь, и является источником тепла в процессе формирования покрытий.

Как правило, отдельным самостоятельным способом принято считать детонационный метод поверхностной обработки, т. к. энергоносителем в этом процессе является детонационная волна, получаемая в результате взрыва ацетиленокислородной смеси газов [2; 3].

Процессы напыления, благодаря преимуществам технологического процесса, таким как: возможность нанесения различных покрытий на изделия, изготовленные практически из любого материала, отсутствие ограничений по размеру обрабатываемых изделий, возможность нанесения достаточно толстых покрытий (до нескольких миллиметров), относительная простота конструкции оборудования, сравнительно небольшие термические и остаточные напряжения, простота и технологичность операции напыления, высо-

кая производительность и дешевизна, заняли особое место в ряду современных способов поверхностной обработки материалов [1; 2; 4].

Последнее десятилетие бурное развитие получили методы металлизации в вакууме, попытки анализа и классификации которых приведены в работах [5; 6].

В работе [6] проведено сравнение основных способов металлизации в вакууме и свойств получаемых при этом покрытий. Приведенная автором классификация основных методов вакуумной металлизации содержит три большие группы, отличающиеся по характеру и интенсивности энергетического воздействия на обрабатываемую деталь и материал покрытия, выделяя способы: испарение-конденсация, распыление в сильном электрическом поле, придающем частицам наносимого материала высокие ускорения, способ ионного осаждения.

Достаточно подробно изложены достижения в области электроискрового осаждения покрытий, происходящего, как правило, в вакууме. Электроискровое осаждение – это микросварочный процесс, основанный на кратковременных электрических импульсах высокой силы тока для осаждения металла электрода на подложку из любого электропроводного материала. Это дает основание выделить метод электроискрового осаждения в отдельный способ вакуумной металлизации [7].

Большой интерес вызывает в последнее время процесс электроконтактного напекания, разработанный Белорусской школой во главе с Н. Н. Дорожкиным [8–10], отличающийся от известных методов нанесения покрытий своей простотой и уникальным комплексом свойств, получаемых в процессе формирования поверхностного слоя [11]. Сущность этого метода заключается в накатке электропроводного, как правило, металлического порошка, на восстанавливаемые поверхности деталей с одновременным пропуска-

нием высоких токов через очаг деформации, обладающего, в силу большой пористости, значительным удельным электрическим сопротивлением [12–14]. Электродами в этом случае являются, как правило, сама восстанавливаемая деталь и инструмент, воздействующий на наносимую порошковую среду. Нанесение порошковых покрытий может осуществляться как в режиме плавления, так и в режиме спекания и припекания [15–17]. Также различают электроконтактную наплавку и припекание в защитной газовой и транспортирующей атмосфере, на воздухе, в жидких средах [18].

Таким образом, проведенный анализ и классификация способов поверхностной обработки деталей и инструмента различного назначения позволили выявить наиболее распространенные и перспективные методы восстановления изделий, к которым относятся способы напыления, вакуумной металлизации и электроконтактного напекания [19; 20].

В настоящей работе исследован процесс плазменного напыления покрытий из карбидосталей на основу из углеродистой стали 45, поскольку этот способ наиболее перспективен и доступен.

## Материалы и методы

Свойства карбидосталей зависят от свойств тугоплавкой и металлической составляющих, а также от их процентного соотношения в сплаве.

В работе использовали карбидостали следующих составов, %: 10 TiC, ост. сталь Х6В3М (1,26 С; 5,4 Cr; 2,25 W; 0,45 Mo; 80,64 Fe), маркировка состава 106; 40 TiC, ост. сталь Х6В3М (0,84 С; 3,6 Cr; 1,5 W; 0,3 Mo; 53,76 Fe), маркировка состава 406; 40 TiC, ост. сталь Х12М (0,93 С; 7,05 Cr; 0,3 Mo; 51,72 Fe), ранее разработанных на кафедре порошковой металлургии и функциональных покрытий НИТУ МИСиС.

Исходными материалами служили: углетермический карбид титана ( $C_{\text{общ}} = 19,0$ ;  $C_{\text{св}} = 0,3$ ) ТУ 6-09-492-75; железо

марки ПЖРВ 2.200.28 ТУ; хром марки ПХ-1С ТУ 14-121474-75; вольфрам марки ПВ-1 ТУ 481972-73; молибден марки ТУ 48-19-105-73; сажа марки ГК-1 ГОСТ 4404-78. Сажу подвергали дополнительной обработке: сажу прокаливали в течение трех часов при 450–500°C для удаления влаги.

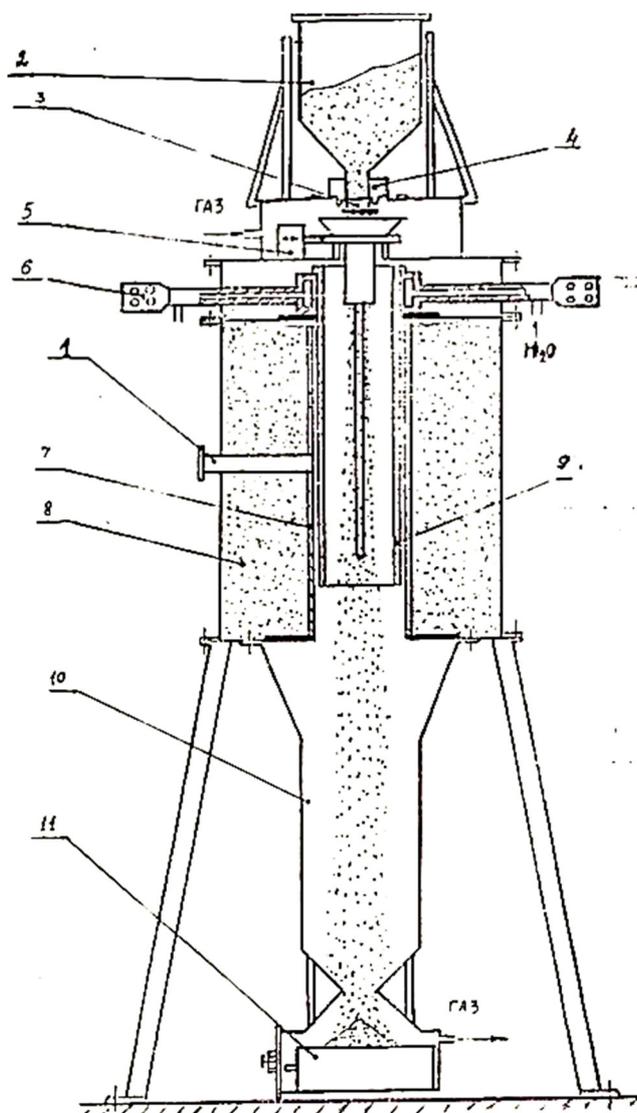
Карбидосталь получали смешиванием компонентов стали и карбида титана в шаровой твердосплавной мельнице в спирте (0,25 л на 1 кг смеси) в течение 48 часов при соотношении шары:смесь = 3:1. Режим смешивания установлен ранее проведенными работами на кафедре.

После смешивания шихту сушили при 80–100°C в сушильном шкафу.

Грансостав определяли на универсальном лазерном приборе FRITSCH ANALYSETTE 22 MicroTec plus, оснащенном блоком диспергирования в жидкой среде.

Текучесть измеряли по ГОСТ 20899-98. Насыпная плотность измерялась по ГОСТ 19440-94.

Для обеспечения стабильной, регулируемой подачи частиц в плазменную струю необходима грануляция порошковой смеси, которую проводили методом оплавления на установке, схема которой приведена на рисунке 1.



**Рис. 1.** Схема подачи частиц в плазменную струю для грануляции порошковой смеси

**Fig. 1.** Flow diagram of the particles into the plasma jet for granulation of the powder mixture

Сущность способа заключается в свободном падении порции порошковой смеси через горячую зону вертикальной трубчатой печи, температура и длина которой достаточны для оплавления и сфероидизации частиц под действием сил поверхностного натяжения.

Плазменное напыление покрытий проводили на установке УПУ-3Д на подложку из стали 45 в аргонно-азотной плазме. Варьировали следующие параметры: напряжение, силу тока, дистанцию напыления, расход газа. Контроль осуществляли по пористости, прочности сцепления слоя с подложкой, определенной по методу штифта.

Для оценки наличия взаимодействия составляющих компонентов карбидоста-

лей при грануляции определяли твердость гранул по методу восстановленного отпечатка четырехгранной пирамиды с квадратным основанием (ГОСТ 9450-76) на приборе ПМТ-3.

### Результаты и их обсуждение

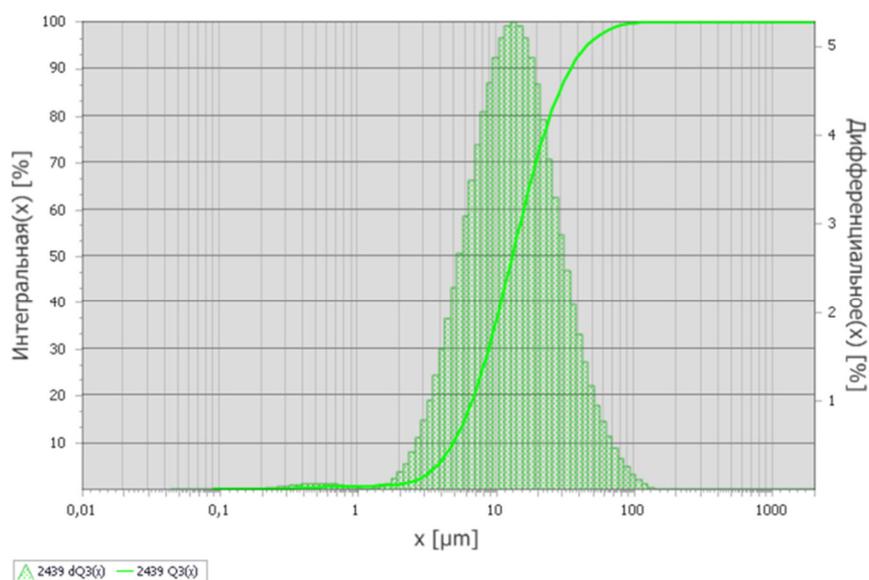
В таблице 1 приведены технологические свойства (текучесть по ГОСТ 20899-75; насыпная плотность по ГОСТ 19440-74) порошковых смесей и стали Х6ВЗМ после грануляции при оптимальной температуре 1800°C.

На рисунке 2 приведен гранулометрический состав порошковых гранулированных смесей.

**Таблица 1.** Свойства порошковых смесей после грануляции при 1800°C

**Table 1.** Properties of powder mixtures after granulation at 1800°C

Марка сплава	Текучесть, с	Насыпная плотность, г/см <sup>3</sup>
Х6ВЗМ	19,9	4,65
106	3,7	4,48
406	44,5	3,50



**Рис. 2.** Гранулометрический состав гранулированной смеси

**Fig. 2.** Granulometric composition of the granular mixture

Микроструктура гранулы карбидостали представляет собой карбидные зерна неправильной формы, разделенные стальной связкой.

Для гранул стали Х6В3М она составляла 5900 МПа, для гранул карбидостали состава 406 – 26000 МПа. Такое изменение твердости позволяет качественно судить о наличии взаимодействия компо-

нентов карбидостали во время грануляции оплавлением. Это подтверждается и измерением параметров кристаллической решетки железа и карбида титана (табл. 2).

Химический состав порошковой стали Х6В3М до и после грануляции представлен в таблице 3.

**Таблица 2.** Параметры решеток TiC и  $\alpha$ -Fe

**Table 2.** Parameters of lattices TiC and  $\alpha$ -Fe

Состав	Параметры решеток, нм	
	$\alpha$ -Fe	TiC
TiC	–	43,28
Fe	28,68	–
Х6В3М	28,71	–
406	28,70	43,28

**Таблица 3.** Химический состав порошковой стали Х6В3М

**Table 3.** Chemical composition of powder steel Cr6W3Mo

Состав	Массовая доля, %				
	W	Mo	Cr	Собщ	Ссвоб
До грануляции	2,50	0,50	6,00	1,40	1,4
После грануляции	2,44	0,44	5,98	1,39	0,2

В исходной смеси количество углерода соответствует химическому составу стали, причем практически все его количество приходится на свободный углерод ( $C_{\text{своб}}$ ). Количество общего углерода несколько уменьшается, что свидетельствует о частичном его выгорании в процессе грануляции. Количество же свободного углерода резко уменьшается, это свидетельствует о растворении углерода и структурообразовании сплава в процессе грануляции.

Для карбидосталей со сталью Х6В3М оптимальными оказались параметры:

$U = 55$  В;  $I = 400$  А;  $L = 0,2$  м;  $V = 3$  м<sup>3</sup>/ч.  
Для карбидосталей со сталью Х12М:  $U = 55$  В;  $I = 350$  А;  $L = 0,08$  м;  $V = 5$  м<sup>3</sup>/ч.  
Свойства покрытий из карбидосталей со сталью Х6В3М приведены в таблице 4, а со сталью Х12М – в таблице 5.

На рисунке 3 представлена зависимость плотности покрытия карбидостали со сталью Х6В3М от толщины слоя. Увеличение толщины покрытия вызывает уменьшение его плотности. Подобная зависимость характерна и для карбидостали со сталью Х12М.

**Таблица 4.** Свойства покрытий из карбидосталей со сталью Х6В3М после напыления и последующей термической обработки

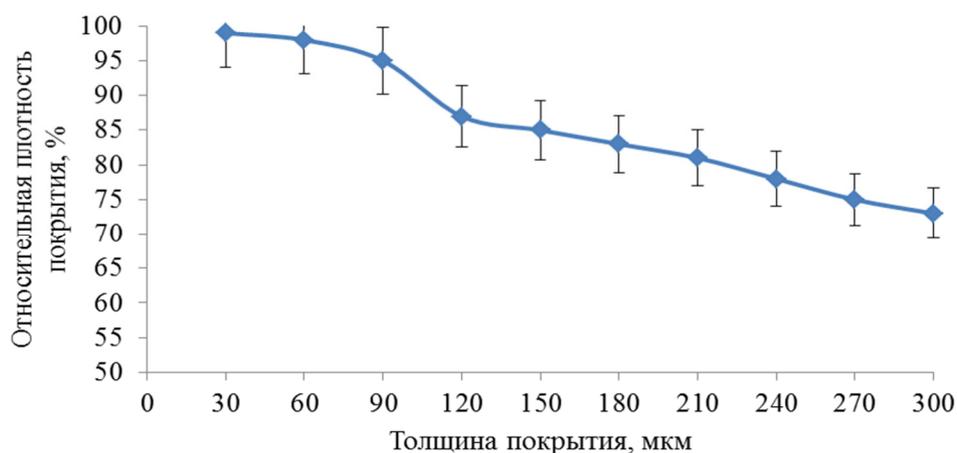
**Table 4.** Properties of coatings made of carbide steels with steel Cr6W3Mo after spraying and subsequent heat treatment

Технологическая операция	Сплав	Пористость, %	Твердость, HRC (HRA)	Износостойкость	Прочность сцепления, МПа
Напыление	106	11,8	(52)	16,35	21,5 · 26,5
Напыление	406	12,1	(66)	18,29	28 · 30
Спекание	106	1	43	21,29	104,3 · 116,3
Спекание	406	2	57	23,44	120 · 131
Закалка	106	–	61	23,62	
Закалка	406	–	72	26,01	–
Отпуск	106	–	60	23,14	–
Отпуск	406	–	70	26,08	–

**Таблица 5.** Свойства покрытий из карбидостали со сталью Х12М после напыления и последующей термообработки

**Table 5.** Properties of coatings made of carbide steel with Cr12Mo steel after spraying and subsequent heat treatment

Режим напыления			После напыления			После спекания			После закалки	
I, А	L, мм	V, м <sup>3</sup> /с·10 <sup>-2</sup>	П, %	HV	σ <sub>сж</sub> , МПа	П, %	HV	σ <sub>сж</sub> , МПа	HV	σ <sub>сж</sub> , МПа
350	40	5	35	550	22	9	740	140	1010	130
350	80	5	24	350	32	1	1245	220	1240	220
400	80	5	28	590	30	5	840	180	1100	170
400	40	5	29	540	30	8	875	180	1100	160
350	40	7	36	310	26	5	740	210	1210	200
350	80	7	32	300	18	7	815	200	990	190
400	80	7	36	290	12	8	780	180	980	160
400	40	7	30	300	18	8	1090	180	1100	170



**Рис. 3.** Зависимость плотности покрытия карбидостали со сталью Х6В3М от толщины слоя

**Fig. 3.** Dependence of the density of the coating of carbide steel with steel Cr6W3Mo on the thickness of the layer

С целью уменьшения пористости покрытий и увеличения прочности сцепления с подложкой проводили вакуумное спекание по режиму спекания карбидосталей [10]: температура 1360–1400°C, время изотермической выдержки 1 ч. После вакуумного спекания существенно возросли плотность и твердость покрытий, прочность сцепления с основой (см. табл. 4, 5).

Термообработка (закалка в масло от 1020°C со связкой Х6В3М, от 950°C; отпуск при 150°C в течение 2 ч) [10] значительно повысила твердость и абразивную износостойкость покрытий (см. табл. 4, 5). Износостойкость оценивали по потере массы при обработке по абразивному кругу из карбида кремния относительно обработки образца основы без покрытия. Таким образом, установлена возможность получения качественных покрытий из карбидосталей на стальной основе методом плазменного напыления.

## Выводы

1. Установлена возможность использования метода плазменного напыления покрытий из карбидосталей разных марок

на стальную основу с целью повышения износостойкости.

2. Исследован способ подготовки порошковых смесей методом оплавления в атмосфере водорода, обеспечивающий достаточную текучесть карбидосталей при формировании покрытий.

3. Установлены оптимальные режимы нанесения покрытий: для карбидосталей со сталью Х6В3М – сила тока 400 А, напряжение 55 В, дистанция напыления 0,2 м, расход газа 3 м<sup>3</sup>/ч; для карбидостали со сталью Х12М – сила тока 350 А, напряжение 55 В, дистанция напыления 0,08 м, расход газа 5 м<sup>3</sup>/ч.

4. Исследованы свойства покрытий из карбидосталей различного состава. Установлена высокая прочность сцепления покрытий с основой после вакуумного спекания (для карбидосталей состава 10% TiC, остальное сталь Х6В3М – 116 МПа, для карбидостали состава 40% TiC, остальное сталь Х12М – 220 МПа), что в совокупности с их высоким и физико-механическими свойствами позволяет рекомендовать метод плазменного напыления покрытий из карбидосталей для получения покрытий с высокой износостойкостью.

## Список литературы

1. Cosnahan T., Watt A., Assender H. Surface and Coatings Technology Modelling of a vacuum metallization // *Surface and Coatings Technology*. 2018. Vol. 336. P. 128–132.
2. Газотермическое напыление композиционных порошков / А. Я. Кулик, Ю. С. Борисов, А. С. Мнухин, М. Д. Никитин. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1985. 199 с.
3. Харламов Ю. А. Состояние и современные тенденции развития детонационно-газового метода нанесения покрытий // *Защитные покрытия на металле*. Киев, 1986. № 20. С. 17–20.
4. Борисов Ю. С., Борисова А. Л. Плазменные порошковые покрытия. Киев: Техника, 1986. 223 с.
5. Линник В. А., Пекшев П. Ю. Современная техника газотермического нанесения покрытий. М.: Машиностроение, 1985. 128 с.
6. Porant Paut R. Vacuum metallizing. 1987. Vol. 85, no. 1A. P. 359–369.
7. Johnoson R. N., Sheldon G. Z. Advances In the electrospark deposition coating process // *Z. Vac. Sci. and technol.* 1986. Vol. A.4, no. 6. P. 2740–2746.
8. Закономерности формирования покрытий в вакууме // В. А. Барвинок, В. И. Богданович, Б. С. Митин [и др.] // *Физика и химия обработки материалов*. 1986. № 5. С. 92–97.
9. Дорожкин Н. Н., Абрамович Т. М., Ярошева В. К. Импульсные методы нанесения порошковых покрытий. Минск: Наука и техника, 1985. 279 с.
10. Гуревич Ю. Г., Нарва В. К., Фраге Н. Карбидостали. М.: Metallurgia, 1988. 141 с.

11. Термохимическое исследование образования силицидов, боридов, карбидов в сплаве Fe–Ni–Cr–Cu–Si–B–C / Ф. Р. Капсаламова, С. А. Красиков, А. Ж. Терликбаева, Е. М. Жилина, А. М. Алимжанова // *Расплавы*. 2023. № 4. С. 414–425.
12. Кирюханцев-Корнеев Ф. В., Шевейко А. Н. Особенности измерения твердости тонких функциональных покрытий методами склерометрии, микро- и наноиндентирования // *Физикохимия поверхности и защита материалов*. 2018. Т. 54, № 5. С. 514–520.
13. Перспективы применения технологии лазерной наплавки для восстановления роликов машин непрерывного литья заготовок / А. В. Макаров, А. Е. Кудряшов, С. В. Невежин, А. С. Герасимов, А. А. Владимиров, Н. Е. Авдеева // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова*. 2020. № 7. С. 108–118.
14. Перспективы применения поверхностного пластического деформирования для снижения шероховатости поверхностей деталей прокатных станков, упрочненных СВС-электродными материалами / А. В. Макаров, А. П. Титова, А. Н. Афонин, А. Е. Кудряшов, А. А. Владимиров // *Вестник Брянского государственного технического университета*. 2020. № 8 (93). С. 4–12.
15. Перспективы применения технологии электроискрового легирования и СВС-электродных материалов для повышения стойкости прокатных валков / А. Е. Кудряшов, Е. А. Левашов, Н. И. Репников, А. В. Макаров // *Нанотехнологии: наука и производство*. 2018. № 2. С. 63–66.
16. Кудряшов А. Е. Анализ современных методов обработки поверхности и электроискровой обработки // *Нанотехнологии: наука и производство*. 2017. № 4. С. 67–75.
17. Перспективы применения электродных СВС-материалов и технологии электроискрового легирования для упрочнения прокатных валков / А. Е. Кудряшов, О. Н. Доронин, Е. И. Замулаева, Е. А. Левашов, Н. В. Швындина // *Черные металлы*. 2013. № 10 (982). С. 61–69.
18. Получение и свойства износостойких комбинированных PVD/CVD-покрытий на твердосплавном инструменте / И. В. Блинков, В. Н. Аникин, Р. В. Кратохвил, М. И. Петржик, Ю. Михальски, А. Наконечны // *Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2010. № 1. С. 37–43.
19. Оценка термической стабильности многослойных наноструктурных покрытий на основе анализа диффузионной подвижности компонентов слоев / А. О. Волхонский, И. В. Блинков, Ю. В. Левинский, Е. А. Скрылева // *Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2016. № 4. С. 86–93.
20. Наноструктурные керамикометаллические покрытия, полученные ионноплазменным вакуумнодуговым методом / И. В. Блинков, Д. С. Белов, А. О. Волхонский, А. В. Черногор, В. С. Сергеевнин // *Вакуумная техника и технология*. 2019. Т. 29, № 3. С. 35–37.

## References

1. Cosnahan T., Watt A., Assender H. Surface and Coatings Technology Modelling of a vacuum metallization. *Surface and Coatings Technology*, 2018, vol. 336, pp. 128–132.
2. Kulik A. Ya., Borisov Yu. S., Mnuhkhin A. S., Nikitin M. D. Gazotermicheskoe napylenie kompozitsionnykh poroshkov [Gas-thermal spraying of composite powders]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., Leningr. otd-nie, 1985. 199 p.
3. Kharlamov Yu. A. Sostoyanie i sovremennye tendentsii razvitiya detonatsionno-gazovogo metoda naneseniya pokrytii [The state and modern trends in the development of the detonation-gas coating method]. *Zashchitnye pokrytiya na metalle = Protective coatings on metal*. Kiev, 1986, no. 20, pp. 17–20.
4. Borisov Yu. S., Borisova A. L. Plazmennye poroshkovye pokrytiya [Plasma powder coatings]. Kiev, Tekhnika Publ., 1986. 223 p.
5. Linnik V. A., Pekshev P. Yu. Sovremennaya tekhnika gazotermicheskogo naneseniya pokrytii [Modern technique of gas-thermal coating]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. 128 p.
6. Porant Paut R. Vacuum metallizing. 1987, vol. 85, no 1A, pp. 359–369.
7. Johnoson R. N., Sheldon G. Z. Advances In the electrospark deposition coating process. *Z. Vac. Sci. and technol.*, 1986, vol. A.4, no. 6, pp. 2740–2746.
8. Barvinok V. A., Bogdanovich V. I., Mitin B. S., eds. Zakonomernosti formirovaniya pokrytii v vakuume [Regularities of the formation of coatings in vacuum]. *Fizika i khimiya obrabotki materialov = Physics and Chemistry of materials processing*, 1986, no. 5, pp. 92–97.

9. Dorozhkin N. N., Abramovich T. M., Yarosheva V. K. Impul'snye metody naneseniya poroshkovykh pokrytii [Pulsed methods of powder coating application]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1985. 279 p.
10. Gurevich Yu. G., Narva V. K., Frage N. Karbidostali [Carbidostali]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1988. 141 p.
11. Kapsalamova F. R., Krasikov S. A., Terlikbaeva A. Zh., Zhilina E. M., Alimzhanova A. M. Termokhimicheskoe issledovanie obrazovaniya silitsidov, boridov, karbidov v splave Fe–Ni–Cr–Cu–Si–B–C [Thermochemical study of the formation of silicides, borides, carbides in Fe–Ni–Cr–Cu–Si–B–C alloy]. *Rasplavy = Melts*, 2023, no. 4, pp. 414–425.
12. Kiryukhantsev-Korneev F. V., Sheveyko A. N. Osobennosti izmereniya tverdosti tonkikh funktsional'nykh pokrytii metodami sklerometrii, mikro- i nanoindentirovaniya [Features of measuring the hardness of thin functional coatings by sclerometry, micro- and nanoindentation methods]. *Fizikokhimiya poverkhnosti i zashchita materialov = Physical chemistry of the surface and protection of materials*, 2018, vol. 54, no. 5, pp. 514–520.
13. Makarov A. V., Kudryashov A. E., Nevezhin S. V., Gerasimov A. S., Vladimirov A. A., Avdeeva N. E. Perspektivy primeneniya tekhnologii lazernoi naplavki dlya vosstanovleniya rolikov mashin nepre-ryvnogo lit'ya zagotovok [Prospects of application of laser surfacing technology for restoration of rollers of continuous casting machines]. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V. G. Shukhova = Bulletin of Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov*, 2020, no. 7, pp. 108–118.
14. Makarov A. V., Titova A. P., Afonin A. N., Kudryashov A. E., Vladimirov A. A. Perspektivy primeneniya poverkhnostnogo plasticheskogo deformirovaniya dlya snizheniya sherokhovatosti poverkhnosti detalei prokatnykh stanov, uprochnennykh SVS-elektrodnymi materialami [Prospects for the use of surface plastic deformation to reduce the roughness of the surfaces of parts of rolling mills hardened with SHS-electrode materials]. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Bryansk State Technical University*, 2020, no. 8 (93), pp. 4–12.
15. Kudryashov A. E., Levashov E. A., Repnikov N. I., Makarov A. V. Perspektivy primeneniya tekhnologii elektroiskrovogo legirovaniya i SVS-elektrodnikh materialov dlya povysheniya stoikosti prokatnykh valkov [Prospects for the use of electric spark alloying technology and SHS-electrode materials to increase the durability of rolling rolls]. *Nanotekhnologii: nauka i proizvodstvo = Nanotechnology: science and production*, 2018, no. 2, pp. 63–66.
16. Kudryashov A. E. Analiz sovremennykh metodov obrabotki poverkhnosti i elektroiskrovoi obrabotki [Analysis of modern methods of surface treatment and electric spark processing]. *Nanotekhnologii: nauka i proizvodstvo = Nanotechnology: science and production*, 2017, no. 4, pp. 67–75.
17. Kudryashov A. E., Doronin O. N., Zamulaeva E. I., Levashov E. A., Shvyndina N. V. Perspektivy primeneniya elektrodnikh SVS-materialov i tekhnologii elektroiskrovogo legirovaniya dlya uprochneniya prokatnykh valkov [Prospects of application of electrode SHS materials and technology of electric spark alloying for hardening of rolling rolls]. *Chernye metally = Ferrous metals*, 2013, no. 10 (982), pp. 61–69.
18. Blinkov I. V., Anikin V. N., Kratokhvil R. V., Petrzhik M. I., Mikhalski Yu., Nakonechny A. Poluchenie i svoistva iznosostoikikh kombinirovannykh PVD/CVD-pokrytii na tverdosplavnom instrumente [Obtaining and properties of wear-resistant combined PVD/CVD coatings on a carbide tool. Proceedings of higher educational institutions]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Poroshkovaya metallurgiya i funktsional'nye pokrytiya = Proceedings of higher educational institutions. Powder metallurgy and functional coatings*, 2010, no. 1, pp. 37–43.
19. Volkhonsky A. O., Blinkov I. V., Levinsky Yu. V., Skryleva E. A. Otsenka termicheskoi stabil'nosti mnogosloinykh nanostrukturnykh pokrytii na osnove analiza diffuzionnoi podvizhnosti komponentov sloev [Assessment of the thermal stability of multilayer nanostructured coatings based on the analysis of the diffusion mobility of the components of layers]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Poroshkovaya metallurgiya i funktsional'nye pokrytiya = Proceedings of higher educational institutions. Powder metallurgy and functional coatings*, 2016, no. 4, pp. 86–93.
20. Blinkov I. V., Belov D. S., Volkhonsky A. O., Chernogor A. V., Sergevnin V. S. Nanostrukturnye keramikometallicheskie pokrytiya, poluchennye ionoplazmennym vakuumnodugovym metodom [Nanostructured ceramic-metal coatings obtained by the ion-plasma vacuum arc method]. *Vakuumnaya tekhnika i tekhnologiya = Vacuum technique and technology*, 2019, vol. 29, no. 3, pp. 35–37.

---

**Информация об авторах / Information about the Authors**

**Нарва Валентина Константиновна**, кандидат технических наук, профессор кафедры «Порошковой металлургии и функциональных покрытий», Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва, Российская Федерация, e-mail: zeinalova@rambler.ru

**Valentina K. Narva**, Candidate of Technical Sciences, Professor of the Department of Powder Metallurgy and Functional Coatings, National Research Technological University MISiS, Moscow, Russian Federation, e-mail: zeinalova@rambler.ru

**Еремеева Жанна Владимировна**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры порошковой металлургии и функциональных покрытий, Национальный исследовательский университет «МИСиС», г. Москва, Российская Федерация, e-mail: eremeeva-shanna@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-1790-5004

**Zhanna V. Ereemeeva**, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Professor of the Department of Powder Metallurgy and Functional Coatings, National Research University MISiS, Moscow, Russian Federation, e-mail: eremeeva-shanna@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-1790-5004

**Гомжин Владимир Владимирович**, аспирант кафедры «Металлургия», Московский Политехнический университет, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: v.gomzhin@mail.ru

**Vladimir V. Gomzhin**, Post-Graduate Student of the Department of Metallurgy, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation, e-mail: v.gomzhin@mail.ru

**Волгина Наталья Ивановна**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Металлургия», Московский Политехнический университет, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: nvolgina2008@rambler.ru

**Natalia I. Volgina**, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor of the Department of Metallurgy, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation, e-mail: nvolgina2008@rambler.ru