

---

---

**НАДЕЖНОСТЬ, ПРОЧНОСТЬ, ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ  
МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ**

---

---

УДК 621.762.227

**СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ  
ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННЫХ КАРБИДОВ****© 2021 г. Е. В. Агеев<sup>1,\*</sup>, С. Б. Беневоленский<sup>2,\*\*</sup>,  
М. Ю. Карелина<sup>3,\*\*\*</sup>, А. Н. Новиков<sup>4,\*\*\*\*</sup>**<sup>1</sup> *Юго-Западный государственный университет, Курск, Россия*<sup>2</sup> *Научно-исследовательский институт – Республиканский исследовательский  
научно-консультационный центр экспертизы, Москва, Россия*<sup>3</sup> *Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),  
Москва, Россия*<sup>4</sup> *Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, Орел, Россия**\*e-mail: ageev\_ev@mail.ru**\*\*e-mail: sbb13@mail.ru**\*\*\*e-mail: karelinamu@mail.ru**\*\*\*\*e-mail: srmostu@mail.ru*

Поступила в редакцию 06.07.2020 г.

Принята к публикации 22.10.2020 г.

В статье представлены результаты изучения характеристик износостойкости газодинамических покрытий, полученных с использованием электроэрозионных карбидов, изготовленных методом электроэрозионного диспергирования из отходов твердых сплавов ВК8 в дистиллированной воде и керосине осветительном. В качестве диспергируемого материала и в качестве электродов использовались изношенные пластины режущего инструмента из спеченных твердых сплавов марки ВК8. Изготовление образцов с покрытиями из порошков ВК8 на поверхности металлических изделий проведено на специализированной установке для сверхскоростного газодинамического формирования. Полученные результаты показали, что наилучшей износостойкостью обладают покрытия, полученные с использованием электроэрозионных карбидов, изготовленных методом электроэрозионного диспергирования из отходов твердых сплавов ВК8 в керосине осветительном, поскольку содержат значительно большее количество свободного углерода.

*Ключевые слова:* твердый сплав, электроэрозионное диспергирование, порошок, газодинамическое покрытие, износостойкость

**DOI:** 10.31857/S0235711921010028

Проблема износостойкости деталей и узлов машин является одной из ведущих в технологии машиностроения. Важнейшим фактором, определяющим длительность работы различных деталей, являются физико-механические свойства их поверхности. Разработка и совершенствование методов модификации поверхности является ведущим направлением повышения качества деталей машин [1–4]. Значительный эффект в решении проблемы модификации рабочей поверхности металлических изделий дает применение технологий для осаждения слоев из твердых, жаро- и коррозионностойких материалов [5, 6]. При этом одной из новых технологий, обеспечивающей возможность модификации поверхностей конструкционных материалов, нанесения на

них покрытий с защитными и другими функциями, является сверхскоростное газодинамическое формирование — одна из разновидностей газотермического напыления промышленных покрытий. Анализ показывает, что при использовании технологии сверхскоростного газодинамического формирования реально в течение длительного периода поддерживать технологическое оборудование в работоспособном состоянии без замены новым. В настоящее время значительный интерес вызывают защитные композиционные покрытия на основе карбида вольфрама, обладающие хорошими физико-механическими и химическими показателями (высокой твердостью, стойкостью к износу и воздействию агрессивной среды, низкой тепло- и электропроводностью и т.д.) [7–10].

Детали из твердых сплавов на основе карбида вольфрама в современной технике находят широкое применение. В связи с высокой стоимостью и дефицитом исходного сырья важными вопросами являются экономия вольфрама в процессе нанесения. Одним из перспективных методов получения покрытия практически из любого токопроводящего материала, в том числе и твердого сплава, отличающегося относительно невысокими энергетическими затратами и экологической чистотой процесса, является метод электроэрозионного диспергирования (ЭЭД) [11–13].

В настоящее время в современной научно-технической литературе отсутствует полноценная информация по использованию карбидов вольфрама, полученных из отходов твердых сплавов электрической эрозией, при газодинамическом формировании покрытий и влиянии их на износостойкость.

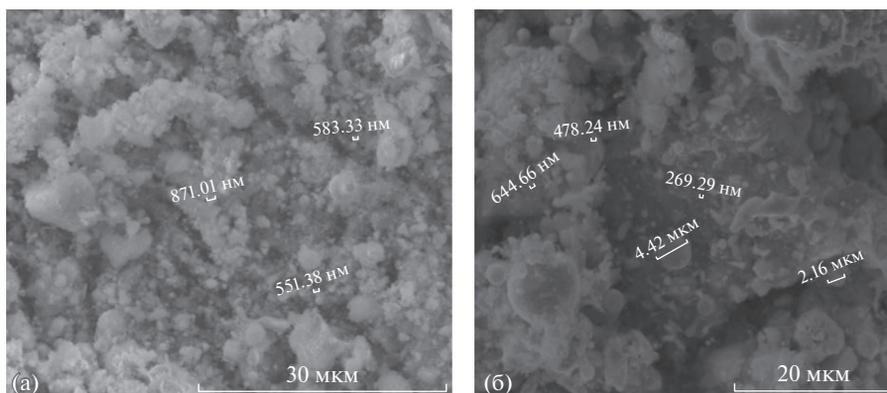
**Целью** настоящей статьи являлось изучение характеристик износостойкости газодинамических покрытий, полученных с использованием электроэрозионных карбидов, изготовленных методом электроэрозионного диспергирования из отходов твердых сплавов ВК8 в воде дистиллированной и керосине осветительном.

**Материалы, методика экспериментов и используемые инструменты.** В качестве исходного (диспергируемого) материала и в качестве электродов использовались изношенные пластины режущего инструмента из спеченных твердых сплавов марки ВК8. Рабочей жидкостью были выбраны вода дистиллированная (ГОСТ 6709–72) и керосин осветительный (ТУ 38.401–58–10–01), как жидкости, имеющие наиболее простой химический состав, достаточно высокую охлаждающую способность, а также относительно низкую стоимость.

Изготовление образцов с покрытиями из порошков ВК8 на поверхности металлических изделий проведено на специализированной установке для сверхскоростного газодинамического формирования в соответствии с ГОСТом 9.302–88 (Покрытия металлические и неметаллические неорганические), 28076–89 (Газотермическое напыление. Термины и определения), 28844–90 (Покрытия газотермические упрочняющие и восстанавливающие), 12.3.008–75 (Система стандартов безопасности труда. Производство покрытий металлических и неметаллических неорганических. Общие требования безопасности), 27953–88 (Детонационные покрытия. Общие требования). Подложка — сталь 12Х18Н10Т.

Технологический процесс сверхскоростного газодинамического формирования покрытий состоит из следующих операций: подготовка поверхности деталей перед нанесением покрытий; подготовка порошка; нанесение покрытий; контроль качества покрытий; механическая обработка; контроль качества покрытий после механической обработки.

Образцы металлических изделий подвергали струйно-абразивной обработке сухими, не загрязненными маслом, острогранными абразивами с размером зерна 1 мм в установке для пневмоструйной обработки Euroblast (фирма Guyson, Великобритания). После струйно-абразивной обработки поверхность деталей обдували сжатым воздухом для удаления остаточных загрязнений. Промежуток времени после подготовки поверхности основного металла до нанесения покрытия не превышал 0.5 ч. По-



**Рис. 1.** Микроструктура и морфология порошков, полученных методом ЭДД: (а) – ВК8 в воде; (б) – ВК8 в керосине.

рошок проходил входной контроль на соответствие паспортных данных по гранулометрическому составу, физико-химическим свойствам и условиям хранения. Отслоения (вздутия), следы местной коррозии и другие дефекты покрытия устранялись обработкой дефектного участка и повторным нанесением на него покрытия.

Нанесение покрытий осуществляли на следующих параметрах: длина ствола 300 мм; диаметр ствола 18 мм; расстояние до образца 55 мм; расход газов ( $\text{м}^3/\text{ч}$ ):  $\text{O}_2$  – 3.3, воздух – 1.56;  $\text{C}_3\text{H}_8$  – 0.66; расход порошка – 1500 г/ч.

Исследование износостойкости экспериментальных образцов проводили методами трибометрии с помощью автоматизированной машины трения (Tribometer, CSM Instruments, Швейцария), управляемой компьютером, по стандартной схеме испытания “шарик–диск”.

Образец устанавливали в держателе, перпендикулярно плоскости образца закрепляли стержень, на конце которого находился шарик диаметром 6 мм из оксида алюминия. С помощью регулировки датчика перемещения выбирали радиус кривизны износа, еще один датчик компенсировал силу трения и позволял установить значение коэффициента трения в определенный момент времени.

Объем удаленного материала покрытия определяли по сечению дорожки износа на поверхности образца с помощью автоматизированного прецизионного контактного профилометра Surtronic 25 производства фирмы Taylor Hobson.

**Полученные результаты и их обсуждение.** Обобщенные данные по результатам исследования полученных порошков представлены в табл. 1 и на рис. 1.

Изучение морфологии и рентгеноспектральный микроанализ порошков, полученных из отходов твердого сплава ВК8 в воде дистиллированной и керосине, выполнял-

**Таблица 1.** Результаты рентгеноспектрального микроанализа порошков, полученных в воде и керосине

| Порошок        | Элемент, % |      |      |      |      |      |      |       |
|----------------|------------|------|------|------|------|------|------|-------|
|                | C          | O    | S    | Cl   | Ti   | Fe   | Co   | W     |
| ВК8 в воде     | 3.75       | 7.74 | 0.33 | 0.16 | 0.36 | 2.17 | 9.78 | 75.71 |
| ВК8 в керосине | 40.91      | 2.77 | 0.33 | –    | 0.59 | 0.72 | 4.03 | 50.64 |

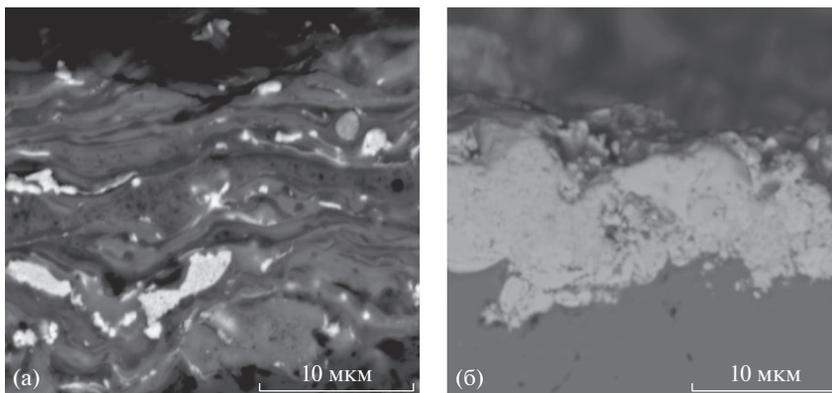


Рис. 2. Микроструктура и морфология полученных покрытий: (а) – ВК8 в воде; (б) – ВК8 в керосине.

ся на растровом электронном микроскопе Quanta200 3D при ускоряющем напряжении 20 кВ.

В порошках, полученных в воде дистиллированной, присутствует значительная часть кислорода, а в порошках, полученных в керосине осветительном, углерода. Все остальные элементы распределены по объему частиц относительно равномерно. Показано, что основными элементами в твердых сплавах из порошков, полученных электроэрозионным диспергированием, как в керосине осветительном, так и в воде дистиллированной, являются W и Co.

Форма частиц полученного порошка в основном сферическая и эллиптическая, а их размер лежит в интервале от 100 нм до 200 мкм, однако исследования морфологии порошков методом сканирующей электронной микроскопии позволяют утверждать, что частицы величиной более 30 мкм – агломераты. Преобладающий размер частиц 500 нм–10 мкм.

Результаты исследования на растровом электронном микроскопе Quanta200 3D микроструктуры и элементного состава газодинамических покрытий на основе порошков, полученных из отходов твердого сплава ВК8 в воде дистиллированной и керосине осветительном, приведены на рис. 2 и в табл. 2.

Исследование микроструктуры поперечного шлифа образцов показало, что получены покрытия толщиной 15–30 мкм без видимых дефектов на границе “покрытие/подложка”. Покрытия имеют смешанную структуру с хорошо проплавленными частицами порошка.

Небольшая толщина покрытий обусловлена малым размером частиц полученных порошков. В процессе нанесения покрытий порошки нагреваются в газовой струе и подаются вместе с ней на подложку. Если порошки имеют малый размер (до 5 мкм),

Таблица 2. Результаты рентгеноспектрального микроанализа полученных покрытий

| Покрытие       | Элемент, % |       |      |      |      |      |      |       |      |       |
|----------------|------------|-------|------|------|------|------|------|-------|------|-------|
|                | C          | O     | Al   | S    | Ca   | Ti   | Cr   | Fe    | Co   | W     |
| ВК8 в воде     | 3.83       | 10.33 | 0.58 | 0.10 | 0.39 | 0.89 | 0.22 | 40.33 | 5.09 | 38.23 |
| ВК8 в керосине | 10.13      | 3.63  | –    | 0.27 | –    | 1.60 | –    | 1.71  | 5.56 | 76.61 |

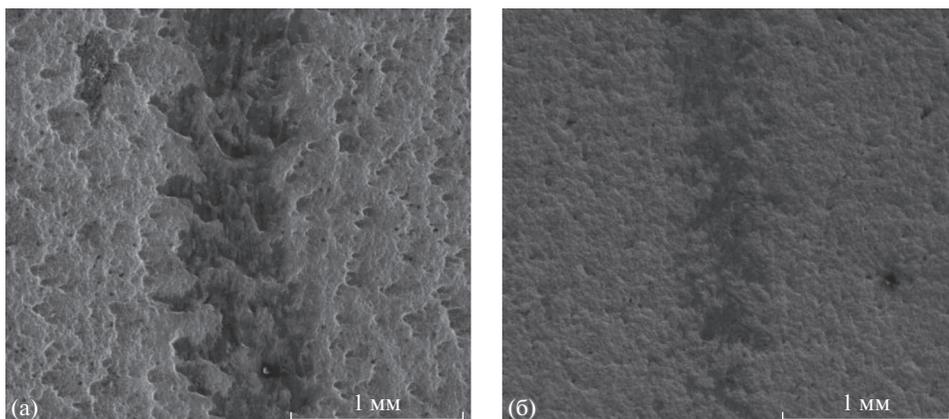


Рис. 3. Дорожки износа на поверхности покрытий после испытаний: (а) – ВК8 в воде; (б) – ВК8 в керосине.

то происходит их перегрев, и они не долетают до подложки. Ранее было установлено, что полученные порошки имеют большое процентное содержание фракции размером до 5 мкм.

Отмечено, что в покрытиях, полученных с использованием электроэрозионных карбидов, изготовленных методом электроэрозионного диспергирования из отходов твердых сплавов ВК8 в воде дистиллированной и керосине осветительном, основными элементами являются W, Co, а также углерод и кислород.

Результаты исследования износостойкости экспериментальных образцов приведены в табл. 3.

Экспериментально установлено, что фактор износа статистического партнера при испытании образца с покрытием, полученным с использованием электроэрозионных карбидов, изготовленных методом электроэрозионного диспергирования из отходов твердых сплавов ВК8 в керосине осветительном, выше, чем фактор износа статистического партнера при испытании образца с покрытием, полученным с использованием электроэрозионных карбидов, изготовленных методом электроэрозионного диспергирования из отходов твердых сплавов ВК8 в воде дистиллированной. Фактор износа образца при испытании образца с покрытием, полученным с использованием электроэрозионных карбидов, изготовленных методом электроэрозионного диспергирования из отходов твердых сплавов ВК8 в керосине осветительном, ниже, чем фактор износа статистического партнера при испытании образца с покрытием, полученным с использованием электроэрозионных карбидов, изготовленных методом электроэрозионного диспергирования из отходов твердых сплавов ВК8 в воде дистиллированной.

Таблица 3. Трибологические характеристики газодинамических покрытий

| Образец        | Фактор износа статистического партнера<br>(шарик $Al_2O_3$ $\varnothing 6$ мм), $мм^3 Н^{-1} м^{-1}$ | Фактор износа образца,<br>$мм^3 Н^{-1} м^{-1}$ |
|----------------|--|--|
| ВК8 в воде     | 5.036  | 3.341  |
| ВК8 в керосине | 5.896  | 2.150  |

Это подтверждается изучением дорожки износа на поверхности покрытий после испытаний на растровом электронном микроскопе Quanta200 3D (рис. 3).

**Выводы. 1.** Проведенные исследования показали, что: 1) в порошках, полученных в воде дистиллированной, присутствует большая часть кислорода, а в порошках, полученных в керосине осветительном – углерода. Все остальные элементы распределены по объему частиц относительно равномерно. Показано, что основными элементами в твердых сплавах из порошков, полученных электроэрозионным диспергированием, как в керосине осветительном, так и в воде дистиллированной, являются W и Co; 2) форма частиц полученного порошка в основном сферическая и эллиптическая, размер этих частиц лежит в интервале 100 нм–200 мкм, однако исследования морфологии порошков методом сканирующей электронной микроскопии позволяют утверждать, что частицы величиной более 30 мкм – агломераты. Преобладающий размер частиц 500 нм–10 мкм.

**2.** Изготовленные экспериментальные образцы металлических изделий с рабочей поверхностью, модифицированной защитными износостойкими порошковыми покрытиями, обладают следующими характеристиками: 1) сформированной толщиной покрытия 15–30 мкм без видимых дефектов на границе “покрытие–подложка”; 2) основные элементы в составе покрытий вольфрам и кобальт, а также углерод и кислород; 3) наилучшей износостойкостью обладают покрытия, полученные с использованием электроэрозионных карбидов, изготовленных методом электроэрозионного диспергирования из отходов твердых сплавов ВК8 в керосине осветительном, поскольку содержат значительно большее количество свободного углерода в отличие от покрытий, полученных с использованием электроэрозионных карбидов, изготовленных методом электроэрозионного диспергирования из отходов твердых сплавов ВК8 в дистиллированной воде.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Погребняк А.Д.* Импульсно-плазменная модификация свойств поверхности и нанесение покрытий / Под ред. А.Д. Погребняк, Ю.Н. Тюрин // Успехи физики металлов, 2003. Т. 4. № 1. С. 1.
2. *Погодаев Л.И., Кузьмин В.Н., Третьяков Д.В.* Влияние металлоплакирующих добавок к пластичным смазкам на работоспособность трибосопряжений // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2003. № 1. С. 54.
3. *Беневоленский С.Б., Лисов А.А.* Алгоритм идентификации процессов деградации физических свойств технических объектов // Измерительная техника, 2005. № 1. С. 16.
4. *Кравченко И.Н., Карелина М.Ю., Зубрилина Е.М., Коломейченко А.А.* Ресурсосберегающие технологии получения функциональных наноструктурированных покрытий высокоскоростными методами нанесения // Вестник Донского государственного технического университета. 2015. Т. 3. № 15 (82). С. 19.
5. *Лесневский Л.Н., Лежнев Л.Ю., Ляховецкий М.А., Трошин А.Е., Ушаков А.М.* Износостойкость композитных плазменных покрытий с графитом // Ж. Проблемы машиностроения и надежности машин. 2017. № 1. С. 31.
6. *Буяновский И.А., Левченко В.А., Большаков А.Н., Самусенко В.Д.* Молибденсодержащее углеродное покрытие триботехнологического назначения и антифрикционные свойства масел при граничной смазке // Ж. Проблемы машиностроения и надежности машин, 2019. № 1. С. 86.
7. *Choi W.B.* Stress-Strain of Thermal Spray Coatings / W.B. Choi // J. Therm. Spray Technol. 2008. V. 18. № 1. P. 58.

- 
8. *Stokes J.* The Theory and Application of the HVOF Thermal Spray Process // J. Stokes. Dublin: Dublin City University, 2005. 204 p.
  9. *Tani K.* Status of Thermal Spray Technology in Japan / K. Tani, H. Nakahira // J. Therm. Spray Technol. 1992. V. 333. № 1. P. 133.
  10. *Murthy J.K.N.* Abrasive wear behaviour of WC-CoCr and Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-20(NiCr) deposited by HVOF and detonation spray processes / J.K.N. Murthy, B. Venkataraman // Surf. Coat. Technol. 2006. V. 200. P. 2642.
  11. *Wanstrand O.* Mechanical and tribological evaluation of PVD WC/C coatings / O. Wanstrand, M. Larsson, P. Hedenqvist // Surf. Coat. Technol. 1999. V. 111. P. 247.
  12. *Ageev E.V., Ageeva E.V., Latypov R.A.* Investigation into the properties of electroerosive powders and hard alloy fabricated from them by isostatic pressing and sintering // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. 2015. V. 56. № 1. P. 52.
  13. *Ageev E.V., Ugrimov A.S., Latypov R.A.* Metallurgical features of the manufacture of hard-alloy powders by electroerosive dispersion of a T15K6 alloy in butanol // Russian metallurgy (Metally). 2016. № 12. P. 1155.