

К. т. н. **Н. В. Титов**<sup>1</sup> (✉), д. т. н. **А. В. Коломейченко**<sup>2</sup>,  
д. т. н. **В. Л. Басинюк**<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО «Орловский государственный аграрный университет имени Н. В. Парахина», г. Орел, Россия

<sup>2</sup> ГНЦ РФ ФГУП «Центральный научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт «НАМИ», Москва, Россия

<sup>3</sup> ГНУ «Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси», Минск, Республика Беларусь

УДК 666.798.2:621.791.3]:631.31.02

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ С НАНОРАЗМЕРНЫМ $Al_2O_3$ , ФОРМИРУЕМЫХ ПРИ КАРБОВИБРОДУГОВОМ УПРОЧНЕНИИ

Приведены результаты исследований физико-механических свойств металлокерамических покрытий, сформированных при карбовибродуговом упрочнении (КВДУ) с использованием многокомпонентной пасты, содержащей наноразмерный  $Al_2O_3$ . Установлено, что наибольшая микротвердость таких покрытий составляет  $HV\ 1110$  на поверхности покрытия и  $HV\ 835$  на границе его раздела с основным металлом. Микроструктура покрытия более мелкозернистая, с равномерным распределением упрочняющих керамических фаз  $B_4C$  и  $Fe_2B$  по всему его объему, а износостойкость в 1,9 раза выше, чем у покрытий, не содержащих в многокомпонентной пасте для КВДУ наноразмерных компонентов. Результаты проведенных исследований показывают, что покрытия перспективны для упрочнения деталей машин разного функционального назначения.

**Ключевые слова:** металлокерамическое покрытие, карбовибродуговое упрочнение (КВДУ), многокомпонентная паста, наноразмерный компонент, оксид алюминия, микротвердость, износостойкость.

### ВВЕДЕНИЕ

Для повышения износостойкости деталей машин, эксплуатируемых в условиях изнашивания, перспективными в настоящее время являются металлокерамические покрытия, создаваемые на рабочих поверхностях деталей разными способами [1–7]. Одним из перспективных способов является карбовибродуговое упрочнение (КВДУ). Перед КВДУ на упрочняемую поверхность наносится вручную или механизированным методом равномерный слой многокомпонентной пасты, далее паста полимеризуется и расплавляется с применением вибрирующего угольного электрода [8–15]. Процесс формирования металлокерамического покрытия с улучшенными триботехническими и физико-механическими свойствами осуществляется за

счет горения электрической дуги. Однако при использовании упрочненных КВДУ деталей машин в условиях высокоинтенсивного изнашивания их износостойкость и ресурс не всегда оказываются достаточными. Это требует проведения дополнительных исследований в данной области.

Известно [16–19], что при добавлении в расплавы сталей всего лишь небольшого количества (1–3 %) металлических или неметаллических порошков наноразмерного диапазона со структурой и свойствами, кардинально отличающимися от макро- и микропорошков аналогичного химического состава, повышаются пределы текучести и прочности, пластичность стали и существенно улучшаются ее физико-механические свойства. Аналогичный эффект от использования порошков наноразмерного диапазона должен наблюдаться и при их введении в состав других материалов, в частности покрытий, формируемых при КВДУ. Однако исследования в этом направлении учеными пока еще не проводились.

Поэтому цель настоящей работы состоит в исследовании физико-механических свойств металлокерамических покрытий, формируемых



Н. В. Титов  
E-mail: ogau@mail.ru

при КВДУ с использованием многокомпонентных паст с добавками наноразмерных компонентов, в сравнении с аналогичными покрытиями без них.

### ОБЪЕКТ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

При формировании способом КВДУ металлокерамических покрытий использовали многокомпонентную пасту, содержащую порошок ПР-НХ13СР3 на никелевой основе, карбид бора и криолит. Проведенный анализ научных публикаций [18, 19] показал, что перспективным наноразмерным компонентом для модифицирования широкого спектра материалов является  $Al_2O_3$ . Он обладает высокой твердостью, износо- и коррозионной стойкостью, низким коэффициентом трения, является ингибитором роста зерен в металлах, а также имеет относительно невысокую стоимость и, кроме того, широко представлен на рынке.

Одним из основных вопросов при разработке технологии модифицирования металлокерамических покрытий является способ введения и равномерного распределения в основном материале модифицирующего наноразмерного компонента. Существующие способы введения в расплавы таких компонентов не всегда отвечают необходимым требованиям. Так, частицы наноразмерных порошков легко слипаются, их окисление начинается при сравнительно низких температурах, в обычной атмосфере они могут взаимодействовать с адсорбированными ими газами и, что особенно важно для создания центров кристаллизации, — они плохо смачиваются расплавом.

Учитывая изложенное, введение наноразмерного  $Al_2O_3$  в состав многокомпонентных паст для КВДУ осуществляли с использованием технологии, описанной в публикации [20]. Вначале нанопорошок вводили в растворитель — дистиллированную воду. Чтобы не происходило слипания и комкования частиц нанопорошка, а также выпадения их в осадок, использовали интенсивные ультразвуковые колебания с применением ультразвуковой установки BANDELIN SONOREX с одновременным непрерывным механическим перемешиванием. В результате происходило равномерное распределение наночастиц по всему объему растворителя. Затем малыми дозами в полученную суспензию добавляли пластификатор — клей ПВА, и в результате образовывался раствор, в котором наночастицы сохраняли однородное пространственное распределение. Далее раствор перемешивали с матрицей и карбидом бора с образованием пасты, которую наносили на поверхность образца из легированной стали 65Г (толщина слоя 2 мм), высушивали (при 80–85 °С в течение 7–8 мин) и расплавляли с применением установки ВДГУ-2 (ток 60–70 А, частота вибрации угольного электрода 25 Гц, амплитуда колебаний электрода 1,1 мм) с образованием металлокерамического покрытия.

Микротвердость металлокерамических покрытий, сформированных при КВДУ с использованием многокомпонентных паст с наноразмерным  $Al_2O_3$  и без него, определяли по стандартной методике [14, 18, 21] с помощью компьютеризированного микротвердомера КМТ-1 по методу Виккерса. Микроструктуру металлокерамических покрытий исследовали на сканирующем электронном микроскопе сверхвысокого разрешения Ultra plus фирмы Zeiss. Испытания на изнашивание проводили по методу «гильзы» на вертикально-сверлильном станке [22, 23]. В качестве среды для проведения испытаний использовали почвенную массу с добавкой кварцевого песка дисперсностью 0,10–0,30 мм. Частота вращения оправки с образцами в почвенной массе 250 мин<sup>-1</sup>, продолжительность испытаний принималась равной 10 ч. Износ испытуемых покрытий определяли по потере массы на электронных весах Setra E-500.

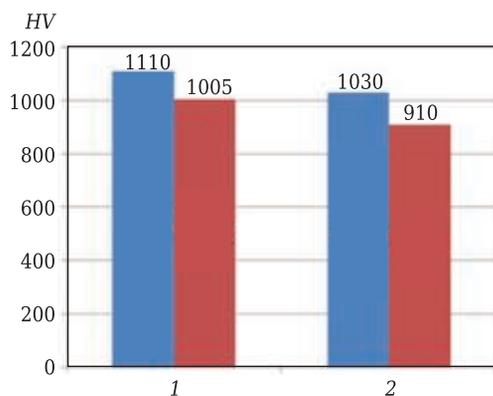
### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследования, проведенные ведущими учеными [8, 10, 14], показали, что при получении металлокерамических КВДУ-покрытий с высокой микротвердостью важная роль принадлежит керамическим компонентам многокомпонентных паст. При этом их наиболее рациональное содержание в пасте составляет от 20 до 30 %, так как при меньшем их количестве существенно снижается микротвердость формируемых покрытий, а при дальнейшем увеличении их содержания начинает уменьшаться ударная вязкость получаемых покрытий из-за недостаточного количества в них матрицы.

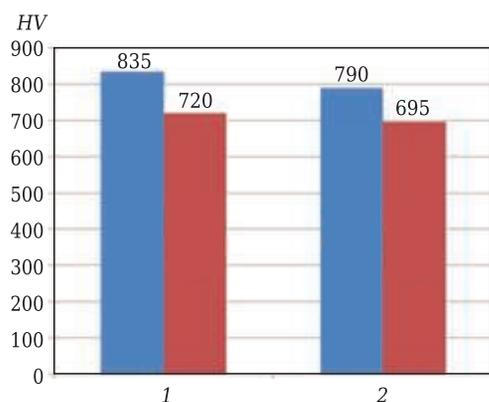
Результаты изменения микротвердости на поверхности покрытий, сформированных с использованием паст с наноразмерным  $Al_2O_3$  и без него, показаны на рис. 1. Введение добавки наноразмерного  $Al_2O_3$  в состав многокомпонентной пасты для КВДУ позволяет получить максимальную микротвердость упрочняющих покрытий, которая составляет  $HV 1110$  при содержании керамического компонента (карбида бора) 30 %. При отсутствии в пасте наноразмерного компонента микротвердость покрытий снижается и составляет  $HV 1030$  и  $HV 910$  при содержании керамического компонента соответственно 30 и 20 % (см. рис. 1).

Результаты изменения микротвердости металлокерамических покрытий с наноразмерным  $Al_2O_3$  и без него на границе раздела с основным металлом показаны на рис. 2. Установлено, что микротвердость металлокерамических покрытий, полученных с использованием многокомпонентных паст с наноразмерным  $Al_2O_3$ , вновь оказалась выше, чем у покрытий из паст без него. Среднее значение микротвердо-

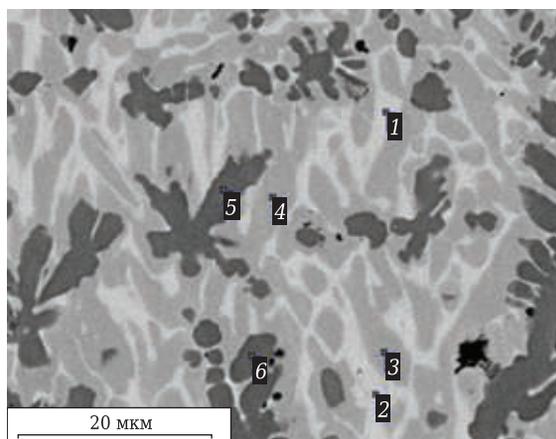
сти таких покрытий составляет  $HV$  835 при содержании керамического компонента 30 %. При отсутствии в пасте наноразмерных компонентов микротвердость покрытий вновь снижается и составляет  $HV$  790 и  $HV$  695 при содержании



**Рис. 1.** Изменение  $HV$  металлокерамических покрытий, сформированных при КВДУ с использованием многокомпонентной пасты с наноразмерным  $Al_2O_3$  (1) и без него (2): содержание керамического компонента 30 (■) и 20 % (■)



**Рис. 2.** Изменение  $HV$  металлокерамических покрытий, сформированных при КВДУ, на границе с основным металлом при использовании многокомпонентной пасты с наноразмерным  $Al_2O_3$  (1) и без него (2): содержание керамического компонента 30 (■) и 20 % (■)



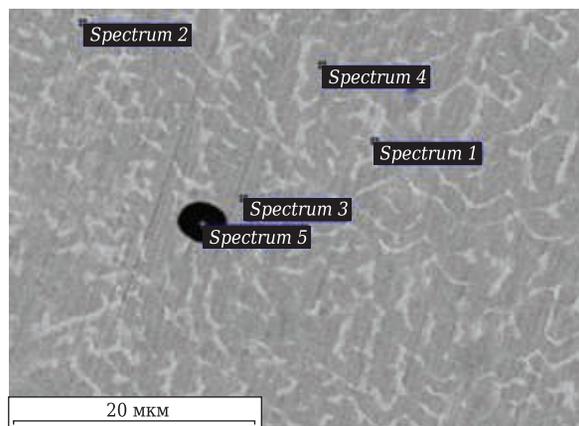
**Рис. 3.** Микроструктура основной зоны металлокерамического покрытия, полученного при КВДУ с использованием пасты без наноразмерного компонента

керамического компонента соответственно 30 и 20 % (см. рис. 2).

Таким образом, проведенные исследования позволили установить, что металлокерамические покрытия, полученные при КВДУ с использованием многокомпонентных паст с наноразмерным  $Al_2O_3$ , имеют более высокую микротвердость как на поверхности покрытия, так и на границе его раздела с основным металлом. Поэтому такие пасты перспективны для упрочнения деталей машин разного функционального назначения.

Ранее проведенные исследования [9, 11, 15] позволили установить, что в металлокерамических покрытиях, сформированных способом КВДУ, независимо от состава используемых многокомпонентных паст можно выделить две характерные зоны: основную и переходную. Исследования, проведенные в настоящей работе, хорошо коррелируются с ранее проведенными экспериментами. Установлено, что основная зона покрытия, сформированного при КВДУ с использованием многокомпонентной пасты без добавки наноразмерного  $Al_2O_3$ , представляет собой железо-никелевую матрицу  $Ni_3Fe$  (рис. 3, спектры 1, 2), в которой относительно равномерно распределены упрочняющие фазы  $Fe_2V$  и  $V_4C$  (спектры 3–6). Их длина в среднем составляет 10–30 мкм, толщина 2–5 мкм.

Введение в состав многокомпонентной пасты для КВДУ наноразмерного  $Al_2O_3$  приводит к измельчению структуры металлокерамического покрытия и более равномерному распределению упрочняющих керамических фаз  $V_4C$  и  $Fe_2V$  (рис. 4, спектры 3, 4) по всему объему покрытия.



Spectrum	B	C	O	Al	Si	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu
Spectrum 1	-	2,63	-	1,44	3,65	1,93	0,59	59,87	29,02	0,87
Spectrum 2	-	2,95	-	1,54	3,75	1,93	0,74	58,35	29,42	1,31
Spectrum 3	7,88	7,02	-	0,82	0,53	4,20	0,69	66,24	12,63	-
Spectrum 4	6,78	6,24	-	0,72	0,07	4,72	0,63	70,32	10,51	-
Spectrum 5	12,96	80,95	0,53	0,06	0,03	1,02	0,96	2,86	0,63	-

**Рис. 4.** Микроструктура и результаты рентгеноспектрального анализа основной зоны металлокерамического покрытия, полученного при КВДУ с использованием пасты с наноразмерным  $Al_2O_3$

Подобный эффект не наблюдается при использовании для КВДУ многокомпонентных паст без наноразмерного компонента.

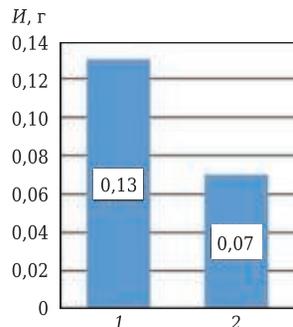
Результаты исследований по изменению износостойкости металлокерамических покрытий, сформированных с использованием паст с наноразмерным  $Al_2O_3$  и без него, показаны на рис. 5. Добавка наноразмерного  $Al_2O_3$  в состав многокомпонентной пасты для КВДУ позволяет уменьшить износ сформированных покрытий в 1,9 раза.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Определены основные физико-механические свойства металлокерамических покрытий, сформированных при КВДУ с использованием многокомпонентной пасты с наноразмерным  $Al_2O_3$ . Установлено, что наибольшая микротвердость таких покрытий составляет  $HV\ 1110$  на поверхности покрытия и  $HV\ 835$  на границе его раздела с основным металлом. Микроструктура таких покрытий более мелкозернистая, с равномерным распределением упрочняющих керами-

## Библиографический список

1. **Дорохов, А. С.** Повышение износостойкости покрытий, полученных при ТВЧ-борировании с модификацией интерметаллидами систем Fe–Al и Ni–Al / А. С. Дорохов, В. Ф. Аулов, В. П. Лялякин [и др.] // Технология машиностроения. — 2020. — № 2. — С. 23–33.
2. **Stolin, A. M.** Deposition of protective coatings by electric arc cladding with SHS electrodes / A. M. Stolin, P. M. Bazhin, M. V. Mikheyev [et al.] // Welding International. — 2015. — Vol. 29, № 8. — P. 657–660.
3. **Гольшев, А. А.** Формирование металлокерамических покрытий  $V_4C-Ti-6Al-4V$  методом SLM / А. А. Гольшев, А. М. Оришч, А. А. Филиппов // Металловедение и термическая обработка металлов. — 2020. — № 11 (785). — С. 39–43.
4. **Фомин, В. М.** Создание металлокерамических структур на основе Ti, Ni, WC и  $V_4C$  с применением технологии лазерной наплавки и холодного газодинамического напыления / В. М. Фомин, А. А. Гольшев, В. Ф. Косарев [и др.] // Физическая мезомеханика. — 2019. — Т. 22, № 4. — С. 5–15.
5. **Леонтьев, Л. Б.** Управление формированием композиционных износостойких металлокерамических покрытий на поверхностях трения деталей / Л. Б. Леонтьев, Н. П. Шапкин, А. Л. Леонтьев [и др.] // Фундаментальные исследования. — 2012. — № 11. — С. 630–635.
6. **Руденская, Н. А.** Эффекты упрочнения металлокерамических покрытий в процессе их формирования / Н. А. Руденская, Г. П. Швейкин, В. А. Гулецкий // Доклады Академии наук. — 2010. — Т. 433, № 6. — С. 776–779.
7. **Гальченко, Н. К.** Особенности формирования структуры и свойства металлокерамических покрытий, полученных нитридо-плазменной технологией / Н. К. Гальченко, В. П. Самарцев, С. И. Белюк [и др.] // Проблемы черной металлургии и материаловедения. — 2010. — № 1. — С. 60–64.



**Рис. 5.** Износ  $I$  (по массе) металлокерамических покрытий, сформированных при КВДУ с использованием многокомпонентной пасты с добавкой наноразмерного  $Al_2O_3$  (2) и без него (1)

ческих фаз  $V_4C$  и  $Fe_2V$  по всему объему покрытия, а износостойкость в 1,9 раза выше, чем у покрытий без наноразмерных компонентов.

2. Металлокерамические покрытия, сформированные при КВДУ с использованием многокомпонентной пасты с добавкой наноразмерного  $Al_2O_3$ , перспективны для упрочнения деталей машин разного функционального назначения, эксплуатируемых при абразивном изнашивании.

8. **Байниязова, А. Т.** Виброплазменное упрочнение рабочих органов сельскохозяйственных машин / А. Т. Байниязова, М. М. Абжаев, Е. Ю. Кудряшова [и др.] // Технический сервис машин. — 2020. — № 1 (138). — С. 132–142.
9. **Kolomeychenko, A. V.** The microstructure of composite cermet coatings produced by carbo-vibroarc surfacing / A. V. Kolomeychenko, N. V. Titov, V. V. Vinogradov [et al.] // Welding International. — 2017. — Vol. 31, № 9. — P. 739–742. <https://doi.org/10.1080/09507116.2017.1318494>.
10. **Sharifullin, S. N.** Surface hardening of cutting elements agricultural machinery vibro arc plasma / S. N. Sharifullin, N. R. Adigamov, N. N. Adigamov [et al.] // Journal of Physics : Conference Series. — 2016. — Vol. 669, № 1. — P. 012049.
11. **Задорожний, Р. Н.** Металлографические исследования стальных образцов, упрочненных карбовибродугой наплавкой / Р. Н. Задорожний, С. П. Тужилин // Труды ГосНИТИ. — 2016. — Т. 124, № 2. — С. 57–61.
12. **Titov, N. V.** Determination of thermophysical characteristics of reinforcing cermet coatings / N. V. Titov, A. V. Kolomeychenko, R. Yu. Solov'ev [et al.] // Refract. Ind. Ceram. — 2021. — Vol. 62, № 2. — P. 212–215.
13. **Титов, Н. В.** Определение теплофизических характеристик упрочняющих металлокерамических покрытий / Н. В. Титов, А. В. Коломейченко, Р. Ю. Соловьев [и др.] // Новые огнеупоры. — 2021. — № 4. — С. 38–41.
14. **Шарифуллин, С. Н.** Трибологические исследования поверхностей деталей из стали 65Г, упрочненных плазменными методами / С. Н. Шарифуллин, Н. Р. Адигамов, Е. Ю. Кудряшова [и др.] // Технический сервис машин. — 2019. — № 3 (136). — С. 120–127.
15. **Titov, N. V.** Investigation of the hardness and wear resistance of working sections of machines hardened by

vibroarc surfacing using cermet materials / N. V. Titov, A. V. Kolomeichenko, V. N. Logachev [et al.] // Welding International. — 2015. — Vol. 29, № 9. — P. 737–739.

15. **Титов, Н. В.** Особенности строения композиционных металлокерамических покрытий, формируемых с использованием многокомпонентных паст на железной основе / Н. В. Титов, А. В. Коломейченко, П. М. Бажин [и др.] // Композиты и наноструктуры. — 2019. — Т. 11, № 2. — С. 64–68.

16. **Болоцкая, А. В.** Влияние наночастиц нитрида алюминия на структуру, фазовый состав и свойства материалов на основе TiB/Ti, полученных методом СВС-экструзии / А. В. Болоцкая, М. В. Михеев, П. М. Бажин [и др.] // Перспективные материалы. — 2019. — № 1. — С. 73–80.

17. **Соколов, Г. Н.** Модифицирование структуры наплавленного металла нанодисперсными карбидами вольфрама / Г. Н. Соколов, И. В. Лысак, А. С. Трошков [и др.] // Физика и химия обработки материалов. — 2009. — № 6. — С. 41–47.

18. Нанотехнологии в машиностроении / А. Н. Смирнов, В. Л. Князьков, Н. В. Абабков [и др.]. — Кемерово: Сибирская издательская группа, 2014. — 207 с.

19. **Коберник, Н. В.** Современные представления о модифицировании наплавленного металла наноразмерными частицами (обзор) / Н. В. Коберник, Р. С. Ми-

хеев, А. С. Панкратов [и др.] // Сварка и диагностика. — 2015. — № 5. — С. 13–18.

20. **Шарин, П. П.** Новый метод приготовления твердосплавной шихты с упрочняющими наночастицами для изготовления матриц алмазных инструментов / П. П. Шарин // Вестник СВФУ. — 2016. — № 1 (51). — С. 78–87.

21. Методы исследования материалов. Структура, свойства и процессы нанесения неорганических покрытий / Л. И. Тушинский, А. В. Плохов, А. О. Токарев [и др.]. — М.: Мир, 2004. — 384 с.

22. **Михальченко, А. М.** Методология проведения ускоренных сравнительных испытаний на абразивное изнашивание материалов с различным составом, строением и свойствами / А. М. Михальченко, В. П. Лялякин, М. А. Михальченко // Труды ГосНИТИ. — 2014. — Т. 116. — С. 91–96.

23. **Коломейченко, А. В.** Повышение износостойкости металлокерамических покрытий, нанесенных методом карбовибродугового упрочнения / А. В. Коломейченко, И. Н. Кравченко, М. Н. Ерофеев [и др.] // Проблемы машиностроения и автоматизации. — 2019. — № 4. — С. 69–74. ■

Получено 19.10.21

© Н. В. Титов, А. В. Коломейченко,  
В. Л. Басинюк, 2021 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ



## CERAMICS IN EUROPE 2022

Kraków 10<sup>th</sup>–14<sup>th</sup> July 2022

ICC9



## КЕРАМИКА В ЕВРОПЕ 2022

XVII конференция и выставка ECerS (ECerS XVII),  
9-я Международная керамическая конференция (ICC9)  
и конференция Electroceramics XVIII  
запланированы как совместная конференция  
в г. Кракове, Польша, с 10 по 14 июля 2022 г.

Для получения дополнительной информации  
посетите веб-сайт конференции:

[www.ceramicsineurope2022.org](http://www.ceramicsineurope2022.org)

