

**АГРОИНЖЕНЕРИЯ И ПИЩЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
AGROENGINEERING AND FOOD TECHNOLOGIES**

**ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ
ДЛЯ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА
(ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)**

**Научная статья
УДК 621.78**

**ОБОСНОВАНИЕ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ
ФОРМИРОВАНИЕ ОДНОРОДНЫХ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ
ПРИ КАРБОВИБРОДУГОВОМ УПРОЧНЕНИИ**

¹Николай Владимирович Титов, ²Александр Викторович Коломейченко,

¹Владимир Николаевич Логачев, ¹Наталья Александровна Березина,

¹Сергей Александрович Зайцев

¹ФГБОУ ВО Орловский ГАУ, г. Орел, Россия

²ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», г. Москва, Россия

Аннотация. Учёные Орловского ГАУ проводят исследования перспективного способа повышения ресурса деталей сельскохозяйственных машин различного функционального назначения – способа карбовибродугового упрочнения (КВДУ) с использованием многокомпонентных паст (МКП). Однако при реализации данного способа усложняется выбор его рациональных режимных параметров, что связано с отличиями КВДУ от традиционной вибродуговой наплавки. Установление аналитических зависимостей, позволяющих прогнозировать нагрев слоя высушенной МКП при её оплавлении, является важным фактором для обоснованного выбора режимных параметров процесса, обеспечивающих формирование однородных металлокерамических покрытий требуемого качества. Формирование покрытий при КВДУ осуществляли с использованием автоматизированной установки, в состав которой входит установка ВДГУ-2. МКП включала матричный порошок ПГ-ФБХ6-2 на железной основе (65 масс.%), карбид кремния SiC (25 масс.%), криолит Na₃AlF₆, в качестве связующего компонента был использован водный раствор клея ПВА-М. Структуру полученных покрытий исследовали на автоэмиссионном сканирующем электронном микроскопе Zeiss Ultra plus. На основе адаптации известных теплофизических зависимостей к условиям реализации технологии КВДУ получены аналитические выражения, связывающие прирост температуры оплаваемого слоя МКП с силой тока, толщиной слоя, коэффициентом полезного действия процесса и продолжительностью теплового воздействия. Численное решение уравнения, описывающего время нагрева слоя высушенной МКП, показало, что среднее значение временного интервала эффективного теплового воздействия составляет 0,0068 с, что соответствует расчётной частоте вибрации угольного электрода 30 Гц. С учётом технологических ограничений оборудования рекомендованное значение частоты вибрации угольного электрода принято равным 25 Гц. При данных условиях оптимальная скорость линейного перемещения электрода лежит в диапазоне 5,5...6,0 мм/с. Экспериментальная апробация подтвердила наличие технологических дефектов (повышенной пористости и несплавления покрытия с основным металлом) при скорости перемещения электрода 7 мм/с и более, обусловленных неполным расплавлением отдельных участков слоя МКП. При скорости перемещения электрода 5,5...6,0 мм/с подобных дефектов не обнаружено, что подтверждает корректность полученных аналитических зависимостей. Таким образом, теоретически обоснованные и экспериментально подтверждённые режимные параметры процесса КВДУ обеспечивают формирование однородных металлокерамических покрытий высокого качества.

Ключевые слова: карбовибродуговое упрочнение, металлокерамическое покрытие, многокомпонентная паста, режимные параметры, ресурс, вибрирующий угольный электрод, тепловое воздействие, структура покрытия.

Для цитирования: Обоснование режимных параметров, обеспечивающих формирование однородных металлокерамических покрытий при КВДУ / Н.В. Титов, А.В. Коломейченко, В.Н. Логачев и др. // Вестник Брянской ГСХА. 2026. № 5 (117). С. 45-51.

Благодарности: работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Государственное задание № FEEF-2026-0002, регистрационный номер 1025071900002-1-4.1.1;4.5.1.

Original article**SUBSTANTIATION OF OPERATING PARAMETERS THAT ENSURE THE FORMATION OF HOMOGENEOUS METAL-CERAMIC COATINGS DURING CARBO-VIBRO-ARC HARDENING**¹Nikolay V. Titov, ²Aleksandr V. Kolomeichenko, ¹Vladimir N. Logachev, ¹Natal'ya A. Berezina, ¹Sergey A. Zaitsev¹Oryol State Agrarian University, Oryol, Russia² Central Research and Development Automobile and Engine Institute NAMI, Moscow, Russia

Abstract. The scientists of Oryol State Agricultural University are conducting a research into a promising method for increasing the service life of agricultural machinery components for various applications: carbo-vibro-arc hardening (CVAH) using multi-component pastes (MCP). However, the implementation of this method complicates the selection of rational process parameters due to the differences between carbo-vibro-arc hardening and traditional vibratory-arc surfacing. Establishing analytical relationships that allow predicting the heating of the dried MCP layer during melting is an important factor in the well-grounded selection of process parameters that ensure the formation of homogeneous metal-ceramic coatings of the required quality. The formation of metal-ceramic coatings using CVAH was carried out using an automated system, including the VDGU-2 unit. The MCP included iron-based PG-FBK_h6-2 matrix powder (65 wt.%), silicon carbide SiC (25 wt.%), and cryolite Na₃AlF₆. An aqueous solution of PVA-M glue was used as a binder. The structure of the obtained coatings was examined with a Zeiss Ultra plus field emission scanning electron microscope. By adapting known thermophysical dependencies to the conditions of implementing the CVAH technology, analytical expressions were obtained that relate an increase in temperature of the melted MCP layer to current strength, layer thickness, efficiency coefficient, and duration of thermal exposure. A numerical solution of the equation describing the heating time of the dried MCP layer showed that the average value of the time interval of effective thermal exposure is 0,0068 s, which corresponds to the calculated vibration frequency of the carbon electrode of 30 Hz. Taking into account the technological limitations of the equipment, the recommended value for the carbon electrode vibration frequency is 25 Hz. Under these conditions, the optimal linear electrode travel speed is in the range of 5.5...6.0 mm/s. Experimental testing confirmed the presence of process defects (increased porosity and incomplete fusion of the coating with the base metal) at electrode travel speeds of 7 mm/s or more, caused by incomplete melting of individual sections of the MCP layer. No such defects were detected at electrode travel speeds of 5.5...6.0 mm/s, confirming the accuracy of the obtained analytical dependencies. Thus, the theoretically substantiated and experimentally confirmed process parameters of the CVAH process ensure the formation of homogeneous high-quality metal-ceramic coatings.

Keywords: carbo-vibro-arc hardening, metal-ceramic coating, multi-component paste, operating parameters, resource, vibrating carbon electrode, thermal effect, coating structure.

For citation: Substantiation of operating parameters that ensure the formation of homogeneous metal-ceramic coatings during carbo-vibro-arc hardening / N.V. Titov, A.V. Kolomeichenko, V.N. Logachev, et al. // Vestnik of the Bryansk State Agricultural Academy. 2026. № 5 (117). pp. 45-51.

Acknowledgments: the work was carried out with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, State Assignment № FEEF-2026-0002, registration number 1025071900002-1-4.1.1; 4.5.1.

Введение. В настоящее время остро стоит проблема повышения ресурса быстроизнашиваемых деталей сельскохозяйственных машин различного функционального назначения [1-3]. Среди большого количества способов формирования упрочняющих покрытий на изнашиваемых рабочих поверхностях деталей машин одним из перспективных в настоящее время является способ карбовибродугового упрочнения (КВДУ) [4, 5]. Сущность способа заключается в нанесении на упрочняемую поверхность многокомпонентной пасты (МКП), содержащей металлическую матрицу, упрочняющие керамические компоненты и материал, активирующий процесс горения дуги (криолит). Высохшую МКП расплавляют вибрирующим угольным электродом специальной установки [4]. При горении электрической дуги на упрочняемой поверхности из компонентов пасты образуется металлокерамическое покрытие, обладающее высокой износостойкостью [4-8].

На качество покрытий, формируемых при КВДУ, существенное влияние оказывают режимные параметры рассматриваемой технологии. Способ КВДУ имеет некоторое сходство с традиционной вибродуговой наплавкой, однако имеет и ряд существенных отличий от нее. Это приводит к тому, что при КВДУ усложняется выбор рациональных режимных параметров для практической реализации технологии. Важным фактором здесь является установление аналитических зависимостей, поз-

воляющих прогнозировать нагрев слоя высушенной МКП при ее оплавлении при реализации процесса. Это, в свою очередь, позволит осуществить обоснованный выбор режимных параметров процесса, позволяющих полностью расплавить слой МКП и сформировать на упрочняемой поверхности однородное металлокерамическое покрытие требуемого качества.

Цель исследования: установление аналитических зависимостей нагрева слоя высушенной МКП в процессе его оплавления при КВДУ и обоснование режимных параметров, позволяющих формировать однородные металлокерамические покрытия требуемого качества.

Материалы и методы. Формирование металлокерамических покрытий при реализации технологии КВДУ осуществляли с использованием автоматизированной установки, в состав которой входит установка ВДГУ-2 [5, 7, 8]. Управление установкой осуществляется с использованием программы, формирующей G-код. Данная установка позволяет в широких пределах варьировать скорость перемещения угольного электрода относительно упрочняемой поверхности посредством входящих в ее состав шаговых электродвигателей. При формировании покрытий использовали МКП следующего состава: матричный порошок ПГ-ФБХ6-2 на железной основе – 65 масс.%, карбид кремния SiC ГОСТ 26327 – 25 масс.%, криолит Na_3AlF_6 – остальное, связующий компонент – водный раствор клея ПВА-М. По результатам предварительно проведенных исследований именно такое соотношение компонентов МКП является наиболее рациональным для упрочнения деталей машин, работающих в условиях интенсивного абразивного изнашивания [4, 7, 9]. Все МКП готовили смешением входящих в их состав компонентов при помощи шаровой планетарной мельницы типа «Активатор 2SL» [4]. Затем наносили на основу из стали 65Г и высушивали при температуре 80...90°C до отверждения. КВДУ осуществляли с использованием угольного электрода диаметром 8 мм. Исследования структуры полученных металлокерамических покрытий проводили на подготовленных по стандартным методикам поперечных шлифах образцов на автоэмиссионном сканирующем электронном микроскопе сверхвысокого разрешения Zeiss Ultra plus на базе Ultra 55 [7, 10].

Результаты и обсуждение. Для количественного описания динамики нагрева слоя высушенной МКП в процессе его оплавления при КВДУ целесообразно применить известную зависимость [11], адаптированную к условиям рассматриваемой технологии:

$$t = \frac{2Q\sqrt{c_p}}{(4\pi\lambda T)^{3/2}} e^{\frac{-R^2 c_p}{4\lambda T}}, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (1)$$

где t – температура в точке слоя МКП, удалённой на расстояние R от источника теплового воздействия, $^\circ\text{C}$;

Q – количество теплоты, поступающей в зону нагрева при горении электрической дуги, Дж;

c_p – объёмная теплоёмкость слоя высушенной МКП, Дж/(см³·°C);

λ – коэффициент теплопроводности слоя высушенной МКП, Дж/(см·с·°C);

T – временной интервал воздействия, с;

R – пространственная координата (удаление от теплового источника), см.

В рамках рассматриваемой задачи величина R тождественна толщине Δ слоя высушенной МКП. Объёмная теплоёмкость c_p функционально связана с удельной теплоёмкостью c через плотность ρ слоя высушенной МКП: $c_p = c \cdot \rho$. Проведенные нами экспериментальные исследования [12] позволили определить усреднённое значение плотности ρ слоя МКП, равное $2,65 \cdot 10^{-3}$ кг/см³. С учётом этого зависимость (1) преобразуется к виду:

$$t = \frac{2Q\sqrt{c \cdot \rho}}{(4\pi\lambda T)^{3/2}} e^{\frac{-\Delta^2 c \cdot \rho}{4\lambda T}}, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2)$$

Количество теплоты Q , поступающее в зону нагрева при горении электрической дуги, определяется выражением:

$$Q = \mu UI, \text{ Дж}, \quad (3)$$

где μ – коэффициент полезного действия рассматриваемой технологии, находящийся в интервале 0,50...0,65 [12].

Согласно данным, приведенным в работе [13], при стабильном горении дуги при реализации рассматриваемой технологии справедливо соотношение:

$$UI = K_{\vartheta} \cdot I_u^{1,74} \Delta^{0,17} \quad (4)$$

где $K_{\vartheta} = 6,41 \text{ В/(А}^{0,74} \cdot \text{м}^{0,17})$ – коэффициент, отражающий зависимость величины UI от силы тока I_u , задаваемого на панели управления автоматизированной установки для КВДУ, и толщины Δ слоя МКП, необходимых для поддержания устойчивого дугового разряда.

С учетом выражений (3) и (4) зависимость (2) может быть преобразована к виду:

$$t = \frac{2 \cdot \mu \cdot K_{\vartheta} I_u^{1,74} \Delta^{0,17} \sqrt{c \cdot \rho}}{(4\pi \lambda T)^{3/2}} e^{\frac{-\Delta c \cdot \rho}{4\lambda T}}, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5)$$

При горении дуги во временном интервале ΔT наблюдается прирост температура слоя оплавленной МКП на величину Δt . Тогда изменение данной температуры с учетом зависимости (5) может быть описано следующим образом:

$$\Delta t = \frac{2 \cdot \mu \cdot K_{\vartheta} I_u^{1,74} \Delta^{0,17} \sqrt{c \cdot \rho}}{[4\pi \lambda]^{3/2} (\Delta T)^{3/2}} e^{\frac{-\Delta c \cdot \rho}{4\lambda \Delta T}}, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (6)$$

или:

$$\Delta t = \frac{2 \cdot \mu \cdot K_{\vartheta} I_u^{1,74} \Delta^{0,17} \sqrt{c \cdot \rho}}{[4\pi \lambda]^{3/2} e^{\frac{c \cdot \rho}{\Delta}} e^{\frac{1}{4\lambda}}} \frac{1}{(\Delta T)^{3/2} e^{\frac{1}{\Delta T}}} = \frac{\omega}{(\Delta T)^{3/2} e^{\frac{1}{\Delta T}}}, \quad (7)$$

где ω – постоянный для фиксированных значений I_u , Δ и μ коэффициент, равный:

$$\omega = \frac{2 \cdot \mu \cdot K_{\vartheta} I_u^{1,74} \Delta^{0,17} \sqrt{c \cdot \rho}}{[4\pi \lambda]^{3/2} e^{\frac{\Delta c \cdot \rho}{4\lambda}}} = 0,71 \cdot I_u^{1,74} \cdot \mu \frac{\Delta^{0,17}}{e^{0,84\Delta}}, \text{ } ^\circ\text{C}^{5/2} \cdot \text{с}^{3/2} \quad (8)$$

Продолжительность оплавления слоя высушенной МКП обусловлена совокупным влиянием следующих основных факторов: исходной температурой слоя, его толщиной Δ , коэффициентом полезного действия μ и величиной тока I_u .

Время, необходимое для повышения температуры слоя высушенной МКП на 1°C , находится путем решения уравнения:

$$\Delta T = \sqrt[3]{\left(\frac{\omega}{\Delta t \cdot e^{\frac{1}{\Delta T}}} \right)^2}, \text{ с} \quad (9)$$

При КВДУ толщина Δ слоя высушенной МКП является заранее регламентированным параметром. На основании комплекса экспериментальных исследований и анализа научных публикаций [5-9, 12] нами обосновано оптимальное значение Δ , составляющее в среднем 2,0 мм. Также было установлено, что силу тока I_u при реализации рассматриваемой технологии рационально изменять в интервале 60...80 А [7, 9, 12]. С учётом указанных фиксированных параметров выражение (8) принимает следующий вид:

$$\omega = k_I \cdot \mu, \quad (10)$$

где k_I – комплексная константа.

Графическая интерпретация зависимости k_I от тока I_u , представлена на рис. 1.

Из данных, представленных на рис. 1, видно, что длительность нагрева слоя высушенной МКП линейно пропорциональна коэффициенту полезного действия рассматриваемой технологии и величине тока I_u .

Результаты численного решения уравнения (9) для различных комбинаций токов и значений коэффициентов полезного действия показали, что среднее значение величины ΔT составляет 0,0068 с. С учётом того, что эффективная фаза процесса КВДУ занимает приблизительно 20% от общего цикла [13], это соответствует расчётной частоте вибрации угольного электрода 30 Гц. При таких условиях оптимальная скорость линейного перемещения электрода, рассчитанная с учётом геометрических

параметров оплавленной зоны (её размеров в проекции на упрочняемую поверхность) [13], лежит в диапазоне 5,5...6,0 мм/с.

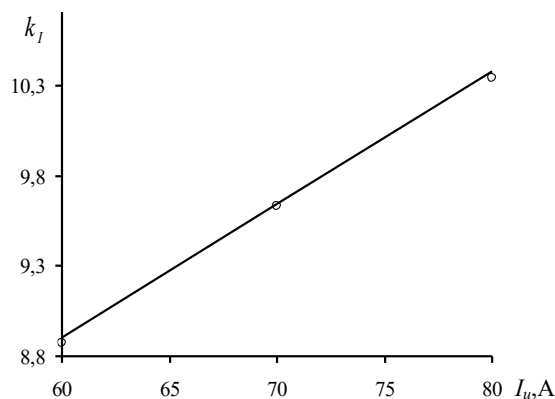


Рисунок 1 – Зависимость комплексной константы k_I от I_u

В реальных производственных условиях с учётом технологических допущений и ограничений оборудования частота вибрации электрода должна быть скорректирована в сторону снижения. Рекомендуемое значение – 25 Гц, поскольку именно такую частоту вибрации обеспечивает установка ВДГУ-2, входящая в состав автоматизированной установки для КВДУ деталей машин различного функционального назначения.

Была также проведена апробация технологии формирования металлокерамических покрытий на режимах, полученных в результате моделирования процесса нагрева оплавляемого слоя высушенной МКП. Структуры сформированных с использованием различных режимных параметров процесса покрытий показаны на рис. 2.

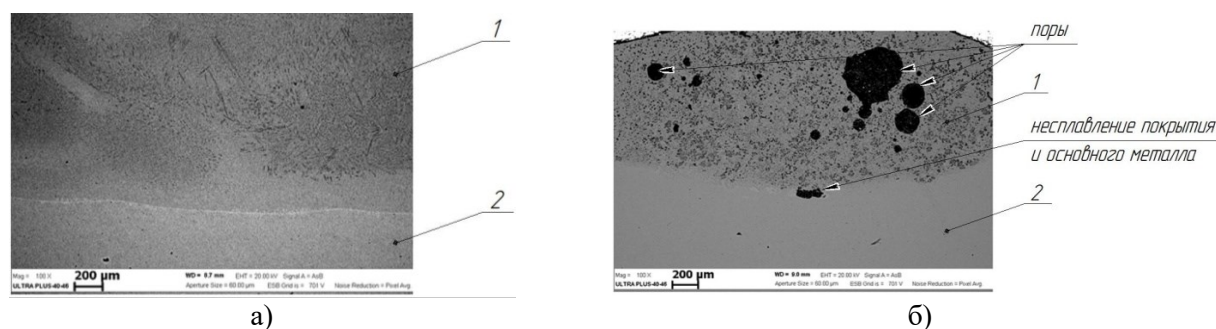


Рисунок 2 – Структуры металлокерамических покрытий, сформированных способом КВДУ при $I_u = 70$ А и скорости перемещения угольного электрода 6 мм/с (а) и 7 мм/с (б). 1 – металлокерамическое покрытие; 2 – основной металл

Проведенные экспериментальные исследования выявили наличие технологических дефектов (повышенной пористости и несплавления покрытия и основного металла) при реализации технологии КВДУ со скоростью перемещения угольного электрода 7 мм/с и более (рис. 2, б). Указанные нарушения структурной целостности покрытий обусловлены тем, что в данном диапазоне скоростей движения электрода отдельные участки слоя высушенной МКП не успевают полностью расплавиться, что и приводит к возникновению дефектов в структуре сформированных покрытий. При скоростях перемещения угольного электрода, изменяющихся в диапазоне 5,5...6,0 мм/с, подобных дефектов обнаружено не было (рис. 2, а).

Таким образом, проведенная апробация подтверждает полученные аналитические зависимости нагрева слоя высушенной МКП в процессе его оплавления при КВДУ. Это, в свою очередь, позволяет использовать их для анализа влияния основных режимных параметров процесса на характеристики формируемого металлокерамического покрытия.

С целью расширения технологических возможностей контроля качества покрытий при КВДУ и обеспечения стабильного поддержания заданных параметров (включая требуемую глубину проплавления основного металла) целесообразно внедрение специализированного оборудования с возможностью программного регулирования длительности эффективного цикла процесса. К числу перспективных решений может быть отнесена автоматизация процесса гашения дуги, а также динамическое управление частотой вибрации и скоростью перемещения угольного электрода.

Выводы. Таким образом, полученные в работе аналитические зависимости нагрева слоя высушенной МКП в процессе его оплавления при КВДУ, а также теоретически обоснованные и экспери-

ментально подтвержденные режимные параметры процесса позволяют формировать однородные металлокерамические покрытия требуемого качества способом КВДУ. При реализации рассматриваемой технологии частота вибрации угольного электрода должна составлять 25 Гц, а скорость перемещения – 5,5... 6,0 мм/с.

Список источников

1. Лялякин В.П. Развитие индустрии по восстановлению деталей для сельскохозяйственных машин в России // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2024. Т. 18, № 2. С. 4-10.
2. Шарая О.А., Пастухов А.Г., Кравченко И.Н. Инженерия поверхности упрочненных деталей: монография. М.: ИНФРА-М, 2020. 124 с.
3. Михальченков А.М., Гуцан А.А., Гапонова В.Е. Повышение износостойкости и межремонтного ресурса плужных лемехов совмещенным способом восстановления и упрочнения // Технология металлов. 2023. № 1. С. 44-48.
4. Формирование композитных покрытий карбовибродуговым упрочнением / Н.В. Титов, А.В. Коломейченко, Е.В. Агеев и др. // Вестник машиностроения. 2022. № 1. С. 62-67.
5. Ресурсосберегающие восстановительно-упрочняющие технологии нанесения износостойких металлокерамических покрытий / А.В. Коломейченко, И.Н. Кравченко, Р.Ю. Соловьев и др. // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2020. № 1. С. 18-22.
6. Обработка результатов экспериментальных исследований использования технологий комплексного микроплазменного упрочнения рабочих органов и деталей сельскохозяйственных машин / Н.Р. Адигамов, И.Х. Гималтдинов, И.Г. Галиев и др. // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2023. Т. 18, № 3 (71). С. 68-75.
7. Повышение ресурса рабочих органов плугов, имеющих лучевидный износ, карбовибродуговым упрочнением / Н.В. Титов, А.В. Коломейченко, В.Н. Логачев и др. // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. 2023. № 2 (38). С. 53-58.
8. Шарифуллин С.Н. Наноструктурирование износостойких покрытий рабочих органов сельскохозяйственных машин методом виброплазменной обработки // Технический сервис машин. 2022. № 2 (147). С. 104-112.
9. Исследование микротвердости и микроструктуры металлокерамических покрытий, формируемых при карбовибродуговом упрочнении / Н.В. Титов, А.В. Коломейченко, В.Н. Логачев и др. // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. 2025. № 1 (45). С. 47-52.
10. Стрoение и свойства металлокерамических композиционных материалов на основе TiC, полученных свободным СВС-сжатием / А.Д. Бажина, М.С. Антипов, А.С. Константинов и др. // Композиты и наноструктуры. 2025. Т. 17, № 3. С. 190-199.
11. Завьялов В.Е., Иванова И.В. Технология, оборудование и материалы сварки плавлением: учебное пособие. М., Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. 548 с.
12. Коломейченко А.В., Титов Н.В., Виноградов В.В. Повышение ресурса стрельчатых лап почвообрабатывающих орудий металлокерамическими покрытиями: монография. Курск: Изд-во ЗАО «Университетская книга», 2018. 169 с.
13. Теоретические основы формирования качественных металлокерамических покрытий при карбовибродуговом упрочнении / Н.В. Титов, А.В. Коломейченко, В.Л. Басинюк и др. // Технология металлов. 2020. № 6. С. 2-11.

Информация об авторах:

Н.В. Титов – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Надежность и ремонт машин» ФГБОУ ВО Орловский ГАУ, ogau@mail.ru.

А.В. Коломейченко – доктор технических наук, профессор, главный специалист управления перспективных технологий центра сельскохозяйственного машиностроения Государственного научного центра Российской Федерации ФГУП «НАМИ», a.kolomiychenko@nami.ru.

В.Н. Логачев – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Надежность и ремонт машин» ФГБОУ ВО Орловский ГАУ, logvovan@mail.ru.

Н.А. Березина – доктор технических наук, профессор, проректор по цифровизации, научной и инновационной деятельности ФГБОУ ВО Орловский ГАУ, prorector4orelsau@mail.ru.

С.А. Зайцев – кандидат технических наук, доцент кафедры «Надежность и ремонт машин» ФГБОУ ВО Орловский ГАУ, serjft@mail.ru.

Information about the authors:

N.V. Titov – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Reliability and Machine Repair Department of the Oryol State Agrarian University named after N.V. Parakhin, ogau@mail.ru.

A.V. Kolomeichenko – Doctor of Technical Sciences, Professor, Center of Agricultural Engineering of the Central Research and Development Automobile and Engine Institute NAMI, a.kolomiychenko@nami.ru.

V.N. Logachev – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Reliability and Machine Repair Department of the Oryol State Agrarian University named after N.V. Parakhin, logvovan@mail.ru.

N.A. Berezina – Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-Rector for Digitalization, Scientific and Innovative Activities of the Oryol State Agrarian University named after N.V. Parakhin, prorector4orelsau@mail.ru.

S.A. Zaitsev – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Reliability and Machine Repair Department of the Oryol State Agrarian University named after N.V. Parakhin, serjft@mail.ru.

Все авторы несут ответственность за свою работу и представленные данные. Все авторы внесли равный вклад в эту научную работу. Авторы в равной степени участвовали в написании рукописи и несут равную ответственность за плагиат. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

All authors are responsible for their work and the data provided. All authors have made an equal contribution to this scientific work. The authors were equally involved in writing the manuscript and are equally responsible for plagiarism. The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 05.09.2026; одобрена после рецензирования 15.09.2026, принята к публикации 05.10.2026.

The article was submitted 05.09.2026; approved after reviewing 15.09.2026; accepted for publication 05.10.2026.

© Титов Н.В., Коломейченко А.В., Логачев В.Н., Березина Н.А., Зайцев С.А.