

ТЕХНИЧЕСКИЙ СЕРВИС В АПК

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.793

DOI: 10.26897/2687-1149-2023-1-71-76



Физико-механические свойства керамических покрытий, получаемых короткоимпульсной лазерной наплавкой порошковой смеси на основе бора

*Алексей Геннадьевич Ипатов, канд. техн. наук, доцент*¹

ipatow.al@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2637-4214>

*Михаил Никитьевич Ерохин, академик РАН, д-р техн. наук, профессор*²

n.erohin@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6573-0950>; Scopus Author ID: 57209270588

*Сергей Павлович Казанцев, д-р техн. наук, профессор*²

smdm@rgau-msha.ru; Scopus Author ID: 57209268547

Павел Владимирович Дородов[✉], д-р техн. наук, доцент¹

pvd80@mail.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0003-1478-5876>

*Александр Васильевич Малинин, аспирант*¹

alexander123799@gmail.com

¹ Удмуртский государственный аграрный университет; 426069, Российская Федерация, г. Ижевск, ул. Студенческая, 11

² Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

Аннотация. Традиционные технологии восстановления деталей, реализуемые в современном ремонтном производстве, не в состоянии обеспечить их необходимую износостойкость в связи с отсутствием современной номенклатуры присадочных материалов с высокими прочностными и технологическими свойствами. Вопросы поиска инновационных материалов и технологий их нанесения на поверхности изношенных деталей являются актуальными и требующими фундаментального исследования. Исследовались физико-механические свойства керамических покрытий, полученных короткоимпульсной лазерной обработкой композиций 5 составов: на основе карбида бора B_4C , дополнительно легированных нитридом бора (0...40% BN), оксидом магния (2...10% MgO) и лития (5...25% LiO). Лабораторные образцы покрытий получали на поверхности образцов из сталей 40X, 35ХГСА. Научная новизна исследований заключается в применении технологий селективного лазерного спекания при формировании тонких покрытий (до 200 мкм) в условиях короткоимпульсного лазерного оплавления порошковых сред. Физико-механические свойства керамических покрытий оценивались на основе анализа микротвёрдости, микроструктуры и трибологических показателей работоспособности с использованием современных методик и приборного обеспечения. Результаты исследований подтверждают возможность практической реализации покрытий на основе керамических соединений. Многослойное керамическое покрытие (B_4C -BN-MgO-Li₂O) толщиной до 200 мкм показало хорошую прирабатываемость, низкий коэффициент трения (0,18) и возможность работы в условиях высоких динамических нагрузок при отсутствии интенсивной смазки. Структура керамических покрытий без видимых дефектов имеет плотную адгезионную зону. Результаты физико-механических свойств керамических покрытий имеют высокий научный потенциал и практическую значимость, а их применение позволит повысить долговечность деталей машин в условиях эксплуатации.

Ключевые слова: керамические покрытия, физико-механические свойства керамических покрытий, коэффициент трения, твердость, однослойное керамическое покрытие, многослойное керамическое покрытие, B_4C , BN, MgO, LiO

Формат цитирования: Ипатов А.Г., Ерохин М.Н., Казанцев С.П., Дородов П.В., Малинин А.В. Физико-механические свойства керамических покрытий, получаемых короткоимпульсной лазерной наплавкой порошковой смеси на основе бора // *Агроинженерия*. 2023. Т. 25, № 1. С. 71-76. DOI: 10.26897/2687-1149-2023-1-71-76.

© Ипатов А.Г., Ерохин М.Н., Казанцев С.П., Дородов П.В., Малинин А.В., 2023

ORIGINAL PAPER

Physico-mechanical properties of ceramic coatings obtained by short-pulse laser surfacing of a boron-based powder mixture

*Aleksei G. Ipatov, CSc (Eng), Associate Professor*¹

ipatow.al@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2637-4214>

*Mikhail N. Erokhin, Full Member of the Russian Academy of Sciences; DSc (Eng) Professor*²

n.erohin@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6573-0950>; Scopus Author ID: 57209270588

Sergey P. Kazantsev, DSc (Eng), Professor²

smdm@rgau-msha.ru; Scopus Author ID: 57209268547

Pavel V. Dorodov[✉], DSc (Eng), Associate Professor¹

pvd80@mail.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0003-1478-5876>

Aleksandr V. Malinin, postgraduate student¹

alexander123799@gmail.com

¹Udmurt State Agrarian University; 1, Studentskaya Str., Izhevsk, 1426069, Russian Federation

²Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation

Abstract. Modern repair production that implements traditional technologies for making restorative coatings has lost its relevance, since it cannot provide the necessary physical and mechanical properties of the coatings. The problem is that in modern metallurgy there is no line of repair additive materials with high strength and technological properties. Therefore, the issues of searching for innovative materials and technologies for their application on the surface of worn parts are relevant and require fundamental research. The aim of the work is to study the physical and mechanical properties of ceramic coatings obtained by short-pulse laser treatment. To achieve this goal, ceramic compositions based on boron carbide, additionally doped with boron nitride (0 to 40% BN), magnesium oxide (2 to 10% MgO) and lithium (5 to 25% LiO), were used. The scientific novelty of the research lies in the application of selective laser sintering technologies in the formation of thin coatings (up to 200 μm) under conditions of a short-pulse laser reflow of powder media. To assess the physical and mechanical properties, laboratory research methods were used, in particular, analysis of the microhardness of the created restorative coatings, microstructure and tribological performance indicators using modern techniques and instrumentation. The research results confirm the possibility of practical implementation of restorative coatings based on ceramic compounds. The multi-layer ceramic coatings (B_4C –BN–MgO–Li₂O) up to 200 μm thick showed good workability, low coefficient of friction (0.18) and the ability to work under high dynamic loads in the absence of intensive lubrication. The structure of the coatings has a dense adhesive zone with no visible defects. The presented results of studying the physic-mechanical properties of ceramic coatings have high research credentials and practical significance, and their application will improve the durability of machine parts in the conditions of their operation.

Keywords: ceramic coatings, physical and mechanical properties of ceramic coatings, friction coefficient, hardness, single layer ceramic coating, multilayer ceramic coating, B_4C , BN, MgO, LiO

For citation: Ipatov A.G., Erokhin M.N., Kazantsev S.P., Dorodov P.V., Malinin A.V. Physico-mechanical properties of ceramic coatings obtained by short-pulse laser surfacing of a boron-based powder mixture. *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2023;25(1):71-76. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-1-71-76>.

Введение. Традиционные технологии, реализуемые в ремонтном производстве, не обеспечивают экономическую эффективность и необходимый ресурс восстанавливаемых деталей. Используемые присадочные материалы и способы их нанесения на изношенные поверхности деталей машин являются причиной низкой эффективности традиционных технологий.

Основные технологии получения покрытий имеют большую толщину наплавляемого слоя, большой припуск на механическую обработку и значительное термическое воздействие на поверхностный слой восстанавливаемого изделия [1-3]. Ограниченная номенклатура присадочных материалов (сварочные и наплавочные проволоки), применяемая в ремонтном производстве, не отвечает современным требованиям по своим физико-механическим свойствам. Используются сложные сплавы с большим разнообразием легирующих и упрочняющих компонентов, которые имеют гетерогенное строение, и зачастую представляющие собой композиционные составы с градиентной структурой и свойствами [4].

Для повышения эффективности покрытий современные присадочные материалы должны иметь ряд основополагающих свойств – таких, как: высокая твердость и прочность при растяжении; высокие

антиокислительные свойства; стабильность фаз и структуры при изменчивости температуры эксплуатации; повышенная термостойкость; высокие трибологические параметры (низкий коэффициент трения, задиростойкость и износостойкость). Получение материалов с вышеуказанными свойствами в рамках одного материала является сложной задачей, требующей фундаментального подхода к исследованиям. Этим требованиям соответствуют керамические соединения, которые широко применяются в инструментальном производстве, авиационной промышленности и ракетостроении [5-7]. Однако для керамики характерны высокая хрупкость, низкая технологичность и наличие высокотемпературных источников энергии для оплавления керамических соединений.

Технология получения объемных компаундов методом селективного лазерного спекания (СЛС-технологии) порошковых сред известна и широко применяется в различных отраслях машиностроения [8, 9]. СЛС-технологии имеют недостатки – такие, как невозможность обработки тугоплавких материалов, наличие высокой остаточной пористости и низкая производительность процесса.

Авторами статьи рассмотрена возможность применения металлочермических соединений для получения

покрытий на поверхности стальных изделий с использованием высокочастотного лазерного излучения.

Цель исследований: анализ физико-механических свойств металлокерамических покрытий, полученных методом высокоскоростного лазерного спекания.

Материал и методы. Для получения керамических покрытий разработана технология высокоскоростного лазерного спекания (ВЛС) керамических порошковых композиций [10]. Отличительной особенностью процесса ВЛС является использование короткоимпульсного лазерного излучения, обеспечивающего температуру в зоне оплавления порошковых материалов до 3800°C и создающего условия для высокоскоростной кристаллизации с формированием наноразмерных кристаллических структур.

Для создания покрытий были исследованы керамические композиции 5 составов (табл. 1).

Выбор керамических материалов обоснован в работе [11]. Лабораторные образцы покрытий получали на поверхности образцов из сталей 40Х, 35ХГСА. В лабораторных условиях исследовались физико-механические свойства керамических покрытий и подложки. С помощью твёрдомера Dura Scan 20 G5 с нагрузкой индентора 50 г определяли микротвёрдость однослойных и многослойных керамических покрытий.

Триботехнические исследования выполнили в условиях граничной смазки на машине трения СМТ-2070 по схеме нагружения «Диск-колодка». В процессе исследований

оценивали коэффициент трения и температуру в зоне контакта. В качестве контртела использовали антифрикционный сплав БрАЖ9-4. Структуру и состояние адгезионной зоны и самого покрытия исследовали на сканирующем электронном микроскопе FEI Inspect S50(СЭМ).

Результаты и их обсуждение. Полученные короткоимпульсной лазерной обработкой однослойные керамические покрытия толщиной 7...10 мкм имели равномерную структуру без видимых следов отслоения и разрушения (рис. 1). Локально проявляются сквозные поперечные трещины, вызванные напряжениями растяжения ввиду разницы в коэффициенте теплового расширения компонентов покрытия и подложки, и они являются незначительными (рис. 1б). Для снижения трещинообразования в состав покрытий вводили оксид магния, который повышает межкристаллитную прочность структуры.

Толщина однослойных покрытий не соответствует требованиям ремонтного производства, и использовать их в качестве ремонтных покрытий достаточно сложно. Необходимо получать покрытия толщиной от 50 до 80 мкм. Для достижения необходимой толщины последовательно наносили 5 слоев, образуя многослойное керамическое покрытие. Результаты металлографического анализа многослойных керамических покрытий представлены на рисунке 2.

Первоначальные исследования многослойных покрытий состава № 1 показали высокую степень трещинообразования и формирование сильно искаженной

Таблица 1. Составы порошковых композиций для получения керамических восстановительных покрытий

Table 1. Powder compositions used for obtaining ceramic restorative coatings

| № состава Coating | Состав покрытия Coating composition | Содержание компонентов, масс.% / Content of components, mass.% | | |
|----------------------|---|--|--------|---------|
| | | BN | MgO | LiO |
| 1 | B ₄ C | - | - | - |
| 2 | B ₄ C-BN | 0...40 | - | - |
| 3 | B ₄ C-BN-MgO | 10...40 | 2...10 | - |
| 4 | B ₄ C-BN-Li ₂ O | 40 | - | 5...25 |
| 5 | B ₄ C-BN-MgO-Li ₂ O | 40 | 10 | 10...15 |

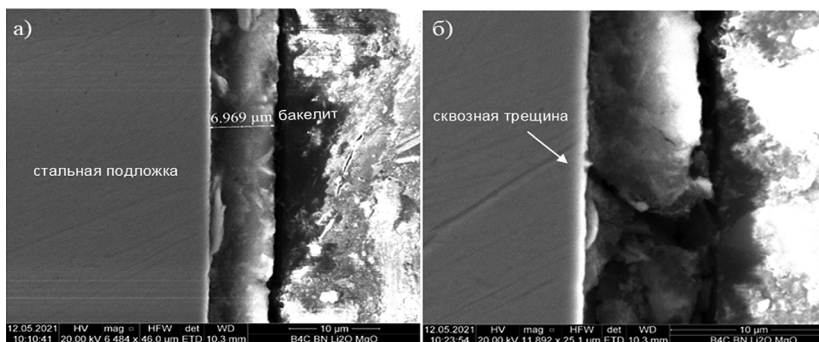


Рис. 1. Однослойное керамическое покрытие на основе B₄C-BN:

- а) структура на границе «Подложка-покрытие»;
- б) сквозная поперечная трещина в покрытии

Fig.1. Single-layer B₄C-BN ceramic coating:

- a) structure at the substrate-coating boundary;
- b) a through transverse crack in the coating

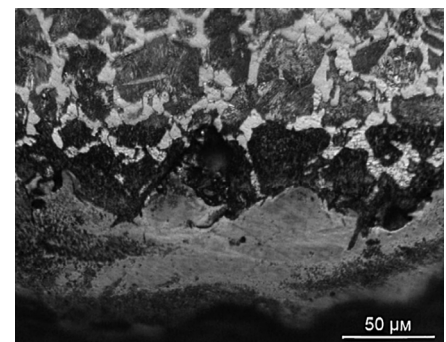


Рис. 2. Многослойное керамическое покрытие, микроструктура состава B₄C-BN-MgO

Fig. 2. Microstructure of a multi-layer B₄C-BN-MgO ceramic coating

поверхности образца с высокой шероховатостью. Кроме того, наблюдались накопление большого количества дефектов и растрескивание покрытия. При этом нанесение последующих слоев приводило к накоплению дефектов и увеличению числа трещин, приходящихся на единицу площади поверхности. Добавление нитрида бора BN в состав покрытия увеличило его однородность, снизило число трещин, но привело к уменьшению толщины покрытия. Добавление оксида магния MgO (состав 3) позволило существенно уменьшить число трещин в покрытии и увеличить его толщину до 200 мкм.

Образование трещин связано не только с сильным различием коэффициента линейного температурного расширения подложки и керамического слоя, но также с большим градиентом температуры при короткоимпульсной лазерной обработке. Результаты рентгеноструктурного анализа (измерение остаточных напряжений) показали, что после остывания подложка испытывает значительные сжимающие напряжения (до 2 ГПа), а покрытие – растягивающие напряжения, это и приводит к её растрескиванию [12, 13]. Полное исключение трещин возможно на покрытиях толщиной до 60 мкм, в составе которых содержится как оксид магния MgO, так и оксид лития Li₂O (состав 5). Оптимальным составом покрытия является соотношение B₄C-40% BN-10% MgO-10% Li₂O.

Результаты измерения шероховатости трехслойных покрытий с толщиной 50 мкм приведены в таблице 2. Добавление оксида лития в состав покрытия значительно

уменьшает конечную шероховатость поверхности, что приводит к снижению себестоимости восстановления изношенных поверхностей, так как исключает дорогостоящую длительную механическую обработку.

На кафедре эксплуатации и ремонта машин Удмуртского ГАУ разработана технология финишной обработки керамических покрытий методом поверхностного пластического деформирования с использованием алмазного наконечника без дополнительной шлифовальной операции.

Увеличение количества слоев приводит к повышению микротвердости покрытий. Влияние упрочняющей фазы BN на микротвёрдость однослойных и многослойных покрытий представлено на рисунке 3.

Анализ микротвердости керамических покрытий показал, что структура покрытия с составом B₄C-BN представляет собой аморфную матрицу, в которой выделены нанокристаллы гексагонального нитрида бора шарообразной формы диаметром от 2 до 10 нм [9, 10]. Вероятно, что полученная композиционная структура, состоящая из аморфной матрицы с выделением из нее включений нитрида бора, эффективно противодействует скольжению дислокаций при пластическом деформировании индентором.

Для определения износостойкости полученных покрытий в условиях контактного трения проводились трибологические исследования в паре с бронзой БрАЖ9-4 с анализом задиростойкости и прирабатываемости. Зависимость коэффициента трения от прилагаемой нагрузки для составов 1-5 показана на рисунке 4.

Таблица 2. Шероховатость трехслойных покрытий толщиной 50 мкм

Table 2. Roughness of three-layer coatings, 50 μm thick

| № пп | Состав покрытия / Coating composition | R _a , мкм | R _z , мкм |
|------|---|----------------------|----------------------|
| 1 | B ₄ C | 4,0 | 50 |
| 2 | B ₄ C-40% BN | 1,5 | 20 |
| 3 | B ₄ C-40% BN-10% MgO | 0,7 | 8 |
| 4 | B ₄ C-40% BN-10% Li ₂ O | 0,7 | 8 |
| 5 | B ₄ C-40% BN-10% MgO-10% Li ₂ O | 0,5 | 6 |

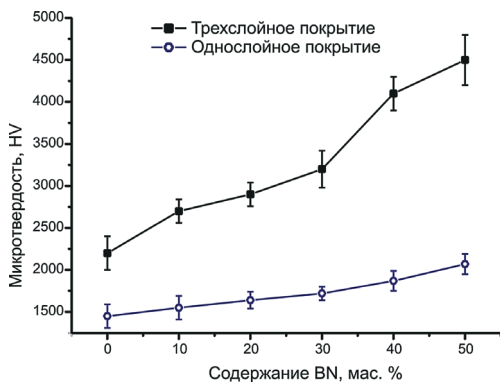


Рис. 3. Микротвердость керамического покрытия состава B₄C-BN в зависимости от содержания нитрида бора

Fig. 3. Effect of boron nitride content on the microhardness of a composite B₄C-BN ceramic coating

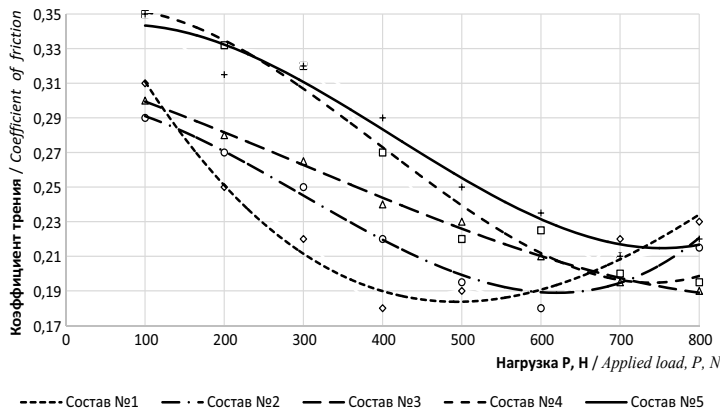


Рис. 4. Изменение коэффициента трения от нагрузки на образцах с многослойными покрытиями

Fig. 4. Change in the coefficient of friction from the applied load of the studied coatings

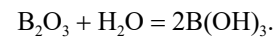
В начале испытаний величина коэффициента трения во многом определяется исходной шероховатостью покрытий, а также эффективностью приработки сопряжений. С увеличением нагрузки и времени испытаний покрытия из порошкового состава № 1 и 2 характеризуются более низким значением коэффициента трения по сравнению с остальными составами (рис. 4). Значительное снижение коэффициента трения с повышением нагрузки показывает способность покрытий с меньшим содержанием BN к лучшей прирабатываемости. Напротив, при увеличении нагрузки до 700 Н и времени испытания 270 мин покрытия с составами № 1 и 2 характеризуются более высоким коэффициентом трения по сравнению с остальными составами (рис. 4).

Отметим, что задиры контактирующих поверхностей и микросхватывание при испытаниях не проявлялись. Покрытие № 1 характеризуется наиболее значительным ростом коэффициента трения с увеличением нагрузки, причём испытания сопровождались резким ростом температуры в зоне трения. Задиры или микросхватывание поверхностей не наблюдались при температуре в зоне контакта около 500°C.

У покрытий № 3, 4 и 5 первоначально коэффициент трения регистрировался выше, чем для покрытий № 1 и 2. Данные испытаний свидетельствуют о затрудненной приработке поверхностей трения этих покрытий, что сказывается на величине эффективной площади контакта. Сравнительно низкая эффективность приработки объясняется более высокой твердостью покрытий. Несмотря на меньшую эффективность приработки, у более твердых покрытий задиры поверхностей трения также не наблюдались. Наименьший коэффициент трения у данных составов проявляется при нагрузках в диапазоне 600...800 Н. В отличие от составов с низким содержанием нитрида бора данные образцы не демонстрируют резкого повышения коэффициента трения, как это было характерно для состава № 1.

Основным механизмом изнашивания покрытия из карбида бора является образование оксида бора B_2O_3

в результате взаимодействия с кислородом окружающей среды. В дальнейшем в присутствии влаги формируется аморфный оксид с температурой плавления 450°C по реакции [4, 10]:



При этом B_2O_3 и $B(OH)_3$ имеют низкую температуру плавления. В результате на поверхности трения образуется тонкий слой стеклообразной жидкой массы из продуктов реакции, что объясняет сохранение низкого коэффициента трения при развитии высоких температур в зоне контакта.

Полученные результаты имеют высокую научную новизну в обосновании процессов изнашивания керамических соединений на основе карбида бора и высокую практическую значимость и могут быть использованы в ремонтном производстве, а также при проектировании деталей машин, эксплуатирующихся в условиях высоких температур и масляного голодания.

Выводы

1. Разработан класс восстановительных покрытий на основе карбида бора, а дополнительное легирование оксидом магния, лития и нитридом бора позволяет обеспечить широкий диапазон их физико-механических свойств.
2. Введение нитрида бора (40% BN) увеличивает твердость до значения 4500 HV, что соответствует сверхтвердым материалам и определяет возможность применения покрытий в условиях интенсивного абразивного изнашивания почвообрабатывающих рабочих органов.
3. Добавление оксида магния (10% MgO) увеличивает толщину покрытия до 200 мкм и формирует высокую плотность и трещиностойкость покрытий, что определяет возможность их применения в циклически нагруженных сопряжениях.
4. Введение в состав оксида лития (25% LiO) повышает задиростойкость покрытия за счет снижения коэффициента сухого трения до 0,18 и уменьшает период прирабатываемости на 45%.

Список использованных источников

1. Величко С.А., Сенин П.В., Чумаков П.В. Пути повышения межремонтного ресурса силовых гидроцилиндров // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2015. № 4. С. 36-41. EDN: TOGVVN
2. Velichko S.A., Senin P.V., Ivanov V.I., Martynov A.V., Chumakov P.V. Formation of thick layer electro-spark coatings for restoring worn-out parts of power hydraulic cylinders. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2017; 53:116-123. <https://doi.org/10.3103/S1068375517020119>
3. Ерохин М.Н., Казанцев С.П., Чупятов Н.Н. Износостойкость карбидосодержащих хромовых покрытий, полученных из газовой фазы // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина». 2017. № 5 (81). С. 48-53. <https://doi.org/10.26897/1728-7936-2017-5-48-53>
4. Kharanzhevskiy E.V., Ipatov A.G., Makarov A.V., Gil'mutdinov F.Z., Soboleva N.N., Krivilyov M.D. Tribological performance

References

1. Velichko S.A., Senin P.V., Chumakov P.V. Ways to increase the overhaul life of power hydraulic cylinders. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya*. 2015;4:36-41. (In Rus.)
2. Velichko S.A., Senin P.V., Ivanov V.I., Martynov A.V., Chumakov P.V. Formation of thick layer electro-spark coatings for restoring worn-out parts of power hydraulic cylinders. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2017;53:116-123. <https://doi.org/10.3103/S1068375517020119>
3. Erokhin M.N., Kazantsev S.P., Chupyatov N.N. Wear-resistance of carbide-containing chrome coatings obtained from the gas phase. *Vestnik of Moscow Goryachkin Agroengineering University*. 2017;5(81):48-53. <https://doi.org/10.26897/1728-7936-2017-5-48-53> (In Rus.)
4. Kharanzhevskiy E.V., Ipatov A.G., Makarov A.V., Gil'mutdinov F.Z., Soboleva N.N., Krivilyov M.D. Tribological performance of boron-based superhard coatings sliding against different materials. *Wear*. 2021;477:203835. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203835>

of boron-based superhard coatings sliding against different materials. 2021;477:203835. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203835>

5. Meschter P.J., Opila E.J., Jacobson N.S. Water Vapor-Mediated Volatilization of High-Temperature Materials. *Annual Review of Materials Research*. 2013;43:559-588. <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-071312-121636>

6. Ma D., Harvey T.J., Zhuk Y.N., Wellman R.G., Wood, R.J.K. Cavitation erosion performance of CVD W/WC coatings. *Wear*. 2020;452-453:203276. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203276>

7. Волков К.Г., Ипатов А.Г., Харанжевский Е.В., Шмыков С.Н. Восстановление и упрочнение рабочей фаски клапана двигателя внутреннего сгорания методом селективной лазерной наплавки (SLM) // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2022. № 9. С. 20-26. <https://doi.org/10.31044/1684-2561-2022-0-9-20-26>

8. Meier C., Penny R.W., Zou Y., Gibbs J.S., Hart A.J. Thermophysical phenomena in metal additive manufacturing by selective laser melting: fundamentals, modeling simulation and experimentation. *Annual Review of Heat Transfer*. 2017;20:241-316. <https://doi.org/10.1615/AnnualRevHeatTransfer.2018019042>

9. Ипатов А.Г., Харанжевский Е.В., Волков К.Г. Исследование свойств керамических покрытий рабочей фаски клапанов двигателей // Сельский механизатор. 2022. № 3. С. 42-44. EDN: JYJSKZ

10. Kharanzhevskiy E.V., Ipatov A.G., Makarov A.V., Gil'mutdinov F.Z., Soboleva N.N., Krivilyov M.D. Effect of oxygen in surface layers formed during sliding wear of Ni-ZrO₂ coatings. *Surface and Coatings Technology*. 2022;434:128174. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128174>

11. Ипатов А.Г., Волков К.Г. К обоснованию материала защитно-восстановительного покрытия рабочей поверхности тарелки клапана // Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии. 2021. № 1 (65). С. 44-50. EDN: GDFFLE

12. Гавриленко О.О., Кривилев М.Д., Харанжевский Е.В., Ипатов А.Г. К вопросу трещиностойкости сверхтвёрдых износостойких покрытий на основе В₄С-BN // Вопросы атомной науки и техники. Серия «Материаловедение и новые материалы». 2021. № 5 (111). С. 23-32. EDN: FBLNUU

13. Дородов П.В. Повышение надежности сельскохозяйственных машин путем оптимизации формы их деталей: Дис. ... д-ра техн. наук. М., 2015. 327 с. EDN ZGDAUP.

Вклад авторов

А.Г. Ипатов – табличное и графическое представление результатов, описание результатов и формирование выводов исследования
М.Н. Ерохин – формулирование основной концепции исследования
С.П. Казанцев – разработка методологии исследования
П.В. Дородов – формулирование основной концепции исследования
А.В. Малинин – подготовка начального варианта текста
А.Г. Ипатов, М.Н. Ерохин, С.П. Казанцев, П.В. Дородов, А.В. Малинин имеют на статью авторские права и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 14.12.2022; поступила после рецензирования и доработки 16.02.2023; принята к публикации 17.02.2023

5. Meschter P.J., Opila E.J., Jacobson N.S. Water Vapor-Mediated Volatilization of High-Temperature Materials. *Annual Review of Materials Research*. 2013;43:559-588. <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-071312-121636>

6. Ma D., Harvey T.J., Zhuk Y.N., Wellman R.G., Wood, R.J.K. Cavitation erosion performance of CVD W/WC coatings. *Wear*. 2020;452-453:203276. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203276>

7. Volkov K.G., Ipatov A.G., Kharanzhevskiy E.V., Shmykov S.N. Renewal and strengthening of the ICE valve face with selective laser surfacing (SLS). *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya*. 2022; 9: 20-26. (In Rus.)

8. Meier C., Penny R.W., Zou Y., Gibbs J.S., Hart A.J. Thermophysical phenomena in metal additive manufacturing by selective laser melting: fundamentals, modeling simulation and experimentation. *Annual Review of Heat Transfer*. 2017;20:241-316. <https://doi.org/10.1615/AnnualRevHeatTransfer.2018019042>

9. Ipatov A.G., Haranzhevskij E.V., Volkov K.G. Studying the properties of ceramic coatings of the working chamfer of engine valves. *Selskiy mekhanizator*. 2022;3:42-44. (In Rus.)

10. Kharanzhevskiy E.V., Ipatov A.G., Makarov A.V., Gil'mutdinov F.Z., Soboleva N.N., Krivilyov M.D. Effect of oxygen in surface layers formed during sliding wear of Ni-ZrO₂ coatings. *Surface and Coatings Technology*. 2022;434:128174. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128174>

11. Ipatov A.G., Volkov K.G. Choosing the material for the protective-and-recovering coating of the valve disc working chamfer. *The Bulletin of Izhevsk State Agricultural Academy*. 2021;1(65):44-50. (In Rus.)

12. Gavrilenko O.O., Krivilyov M.D., Kharanzhevskiy E.V., Ipatov A.G. Crack resistance of super hard wear-resistant coatings based on B₄C-BN. *Voprosy Atomnoy Nauki i Tekhniki (Aspects of Nuclear Science And Engineering)*. *Materials Science and New Materials Series*. 2021;5(111):23-32. (In Rus.)

13. Dorodov P.V. Improving the reliability of agricultural machines by optimizing the shape of their parts: DSc (Eng) thesis. Moscow, 2015. 327 p. (In Rus.)

Contribution

A.G. Ipatov – visualization, writing – original draft preparation (results and discussion, conclusion).
M.N. Erokhin – conceptualization.
S.P. Kazantsev – methodology.
P.V. Dorodov – conceptualization
A.V. Malinin – writing – original draft preparation.

The authors carried out theoretical studies and prepared a manuscript based on the results obtained. A.G. Ipatov, M.N. Erokhin, S.P. Kazantsev, P.V. Dorodov, A.V. Malinin have copyright on the article and are responsible for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper.

Received 14.12.2022; revised 16.02.2023; accepted 17.02.2023