

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ И ПРОТИВОИЗНОСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ХГДН
НА СТАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ**

Терентьев В.В., Суровицкий И.И., Пучков П.В.

Терентьев Владимир Викторович (ORCID 0000-0002-9189-8076), Суровицкий Иван Игоревич
ФГБОУ ВО «Верхневолжский государственный агробиотехнологический университет»,
г. Иваново, Россия. 153012, Ивановская область, г. Иваново, ул. Советская, д. 45.

E-mail: vladim-terent@yandex.ru, surovitsky.ivan@yandex.ru

Пучков Павел Владимирович

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,

г. Иваново, Россия. 153040, Ивановская область, г. Иваново, пр. Строителей, д. 33.

E-mail: palpuch@mail.ru

В статье представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований твердости и износостойкости покрытий, нанесенных на стальную основу методом холодного газодинамического напыления. Представлен механизм взаимодействия напыляемых частиц с поверхностью, отмечены основные факторы, оказывающие наибольшее влияние на характеристики формируемого функционального слоя. Показана эффективность предварительной обработки металлической поверхности кварцевым песком перед нанесением материала. В этом случае формируется необходимый микрорельеф, упрочняется (прирост твердости 9%) и активизируется поверхностный слой за счет пластического деформирования. При нанесении порошков из цветных металлов отмечен рост толщины покрытия в 3,07 - 7,3 раза при повышении давления от 0,4 до 0,6 МПа. Подтверждены ранее опубликованные данные о положительном влиянии частиц корунда в потоке напыляемого материала на прочность получаемого покрытия. Покрытия, сформированные методом холодного газодинамического напыления, отличаются более высокой износостойкостью в условиях абразивного изнашивания по сравнению с основным упрочненным металлом. В случае нанесения алюминийсодержащего покрытия интенсивность изнашивания образца снижается по сравнению с образцом без покрытия в 1,66 раза, при нанесении медьсодержащего покрытия снижение составило в 1,23 раза.

Ключевые слова: прочность, износ, интенсивность изнашивания, твердость, упрочнение, холодное газодинамическое напыление

**STUDY OF STRENGTH AND ANTI-WEAR CHARACTERISTICS OF COMPOSITE COATINGS
OBTAINED BY THE CGDS METHOD ON A STEEL SURFACE**

Terentyev V.V., Surovitsky I.I., Puchkov P.V.

Terentyev Vladimir Viktorovich (ORCID 0000-0002-9189-8076), Surovitsky Ivan Igorevich
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Upper Volga State Agrobiotechnological University",

Ivanovo, Russia. 153012, Ivanovo region, Ivanovo, st. Sovetskaya, 45.

E-mail: vladim-terent@yandex.ru, surovitsky.ivan@yandex.ru

Puchkov Pavel Vladimirovich

Ivanovo Fire and Rescue Academy of the State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters

Ivanovo, Russia. 153040, Ivanovo region, Ivanovo, Stroiteley ave., 33.

E-mail: palpuch@mail.ru

The article presents the results of theoretical and experimental studies of the hardness and wear resistance of coatings applied to a steel base by cold gas dynamic spraying. The mechanism of interaction of the spraying particles with the surface is presented, the main factors that have the greatest influence on the characteristics of the formed functional layer are noted. The effectiveness of pretreatment of the metal surface with quartz sand before applying the material is indicated. In this case, the necessary microrelief is formed, the surface layer is strengthened (an increase in hardness of 9%) and activated due to plastic deformation. When applying non-ferrous metal powders, the coating thickness increased by 3,07 – 7,3 times with an increase in pressure from 0,4 to 0,6 MPa. The previously published data on the positive effect of corundum particles in the spraying material flow on the strength of the resulting coating has been confirmed. The coatings formed by the method of cold gas-dynamic spraying are characterized by higher wear resistance under conditions of abrasive wear compared to the basic hardened metal. In the case of applying an aluminum-containing coating, the wear intensity of the sample decreases compared to the uncoated sample by 1,66 times ; when applying a copper-containing coating, the decrease was in 1,23 times.

Keywords: strength, wear, wear intensity, hardness, hardening. cold gas dynamic spraying

Для цитирования:

Терентьев В.В., Суровицкий И.И., Пучков П.В. Исследование прочностных и противоизносных характеристик композиционных покрытий, полученных методом ХГДН на стальной поверхности. *Современные наукоёмкие технологии. Региональное приложение*. 2026. № 1. С. 174-182 DOI: 10.6060/snt.20268501.00021

For citation:

Terentyev V.V., Surovitsky I.I., Puchkov P.V. Study of strength and anti-wear characteristics of composite coatings obtained by the CGDN method on a steel surface. *Modern high technology. Regional application*. 2026. N 1. P. 174-182 DOI: 10.6060/snt.20268501.00021

ВВЕДЕНИЕ

Научно-технический прогресс в машиностроении предусматривает применение современных материалов, позволяющих по-новому решать задачи, которые ставятся перед техническими средствами [1]. Известно, что основным требованием обеспечения прочности и надежности детали является выполнение условия, когда нагрузочный эффект меньше или равен несущей способности детали [2, 3].

Современные технологии повышения долговечности деталей машин и механизмов весьма разнообразны. Одной из перспективных технологий упрочнения поверхностного слоя металлических изделий является технология холодного газодинамического напыления. Данная технология отличается простотой как технологического процесса, так и аппаратного исполнения. Преимуществом также является возможность нанесения на поверхность детали как отдельных материалов, так и их композиций.

Варьирование параметрами обработки позволяет получать покрытия с различными прочностными характеристиками, обеспечивающими необходимые эксплуатационные характеристики конкретной детали. Процесс холодного газодинамического напыления осуществляется за счет соударения напыляемых частиц (которые разгоня-

ются в потоке газа до сверхзвуковых скоростей) с поверхностью детали. В результате этого происходит пластическое деформирование частиц и закрепление их на поверхности путем образования химических и структурных связей в месте взаимодействия частицы с подложкой [4].

Возможность закрепления частицы на поверхности зависит от энергии удара в точках контакта с поверхностью. При этом в процессе удара происходит деформация как самой частицы, так и поверхностного слоя детали. В зависимости от параметров обработки может происходить как фиксация деформируемой частицы на поверхности, так и отскок частицы от поверхности (процесс эрозии). В процессе движения частиц напыляемого материала в потоке газа со сверхзвуковыми скоростями они приобретают кинетическую энергию, которая в момент удара полностью реализуется на деформирование частицы и поверхностного слоя.

В случае, если энергия удара превышает энергию взаимодействия молекул в поверхностном слое, то помимо механических, появляются и химические (гораздо более прочные) связи между напыляемым материалом и поверхностным слоем.

Большую роль при закреплении частицы играют скорость частицы (что увеличивает давление и температуру в контакте в момент удара) и температура частицы и подложки, что приводит к

увеличению их пластичности, температуры в контакте частица-подложка а, следовательно, и скорости образования химических связей [4-7].

Механизмы взаимодействия напыляемого покрытия и поверхности детали при холодном газодинамическом напылении представлены на рис. 1.

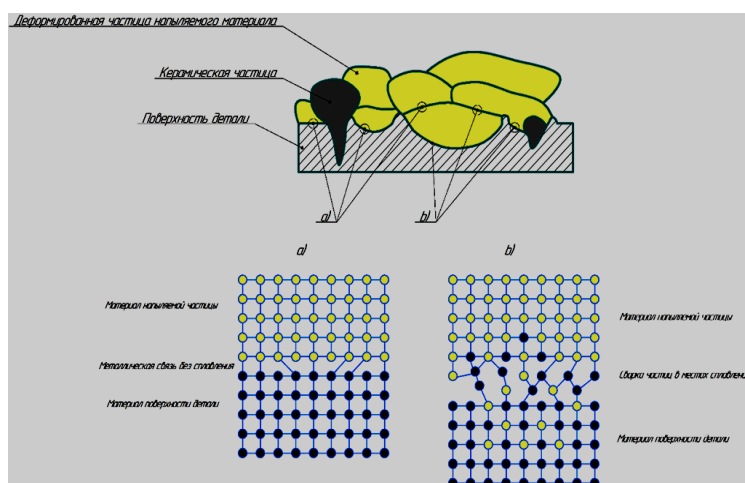


Рис. 1. Механизмы взаимодействия напыляемого покрытия и поверхности детали при холодном газодинамическом напылении

Fig. 1. Mechanisms of interaction between the sprayed coating and the surface details for cold gas dynamic spraying

Так как кинетическая энергия во многом определяется скоростью и массой движущейся частицей, то эти параметры во многом и определяют возможность формирования покрытия на поверхности.

В момент удара частицы по поверхности и деформационных процессов выделяется тепло. В случае, когда вся кинетическая энергия преобразуется в тепловую, максимальное значение температуры напыляемой частицы будет определяться по формуле:

$$T = \frac{v^2}{2 \cdot C_p} + T_1, \quad (1)$$

где v – линейная скорость движения частицы в потоке газа, м/с; C_p – удельная теплоемкость материала напыляемой частицы, Дж/(кг К); T_1 – температура частицы в потоке газа непосредственно перед ударом, К.

Таким образом, увеличение скорости движения частицы приводит к росту температуры в зоне контакта. Снижение теплоемкости наносимого материала также способствует росту температуры. Повышение температуры частицы наносимого материала также способствует росту максимальной температуры. При этом, учитывая, что при ударе происходит деформирование не всего объема частицы, а ее части, соответственно кинетическая энергия передается только в зоне контакта, следовательно, в зоне контакта температура

будет значительно выше, чем определенная по формуле (1).

Наиболее эффективное закрепление частиц на поверхности обрабатываемого материала происходит в том случае, если в зоне контакта частиц с поверхностью будет достигнута температура плавления наносимого материала.

Однако, как видно из рис. 1, в зависимости от области применения детали с нанесенным покрытием, образование металлических связей без сплавления также может обеспечить необходимые функциональные характеристики получаемых покрытий. В случае, если кинетической энергии частицы недостаточно для образования прочной связи с подложкой вследствие недостаточно высокой скорости полета, происходит отскок частицы от поверхности. При этом, вследствие деформации поверхности подложки за счет многократных ударов частиц наносимого материала происходит процесс эрозии.

Это характерно при обработке поверхности керамическими частицами, обладающими высокой твердостью (например оксид алюминия). При этом, в процессе эрозии с поверхности удаляются пленки окислов, и образуются ювенильные поверхности, обладающие повышенной реакционной способностью. Это способствует снижению необходимой энергии для закрепления наносимых частиц на поверхности детали.

Как отмечают авторы [5], в случае практического использования метода ХГДН целесообразно непосредственно перед напылением проводить обработку напыляемой поверхности, что приведет к уменьшению необходимой для напыления скорости частиц.

Авторами [5] указывается, что примесь абразива может существенно повысить коэффициент напыления металлов, а также активирует процесс закрепления частиц материала при более низких температурах, чем при напылении в чистом виде. Целью данной работы являлось исследование прочностных и противоизносных характеристик покрытий, наносимых методом холодного газодинамического напыления порошков при различных технологических параметрах процесса.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Нанесение покрытий на стальную поверхность осуществлялось с помощью установки, представленной в [8]. Для исследований применялись образцы с геометрическими размерами 50х30х5 мм из стали Ст.3 ГОСТ 380-2005.

Для создания наносимых покрытий использовались порошки А-30-01 (алюминий, цинк,

корунд), С-01-11 (медь, цинк, корунд) производства ООО «ОЦПН» (Обнинский центр порошкового напыления). Размеры частиц в порошках: алюминий 15-20 мкм, корунд 20-25 мкм, цинк 7-10 мкм. Перед нанесением материалов для упрочнения поверхности под покрытием, уменьшения пористости поверхности, создания развитого микро рельефа, а также активации поверхности образцы дополнительно обрабатывались методом холодной газодинамической обработки частицами прокаленного кварцевого песка следующего химического состава: SiO_2 – 97,19%; Fe_2O_3 – 0,6%; CaO – 0,4%; MgO – 0,56%; остальные примеси – 1,25%. Также использовался отсев колотой дроби ДСКУ-50 ГОСТ 11964-81 (фракция до 0,31 мм).

Определение твердости образцов осуществлялось на твердомере ТПП-2 алмазной пирамидой, согласно ГОСТ 2999-75 «Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Виккерсу».

Стойкость образцов в условиях абразивного износа о незакрепленный абразив определялась при помощи исследовательской установки, представленной на рис. 2. Линейная скорость образцов составляла 50 м/с. Время одного испытания составляло 120 минут. В качестве абразивной среды использовался кварцевый песок.



а) внешний вид



б) держатель образцов



в) блок управления

Рис. 2. Исследовательская установка для испытания образцов на абразивный износ
Fig. 2. Research facility for testing samples for abrasive wear

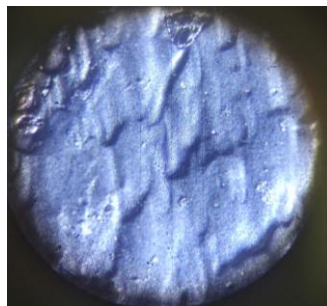
Исследование микроструктуры покрытий осуществлялось при помощи металлографического микроскопа МЕТАМ РВ-21-1.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

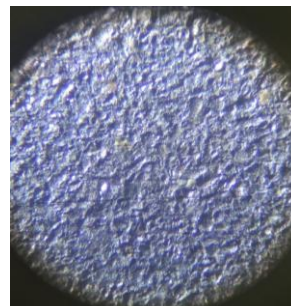
Поверхность образцов после холодной газодинамической обработки представлена на рис. 3. Отсюда видно, что в процессе обработки на поверхности вследствие пластического деформирования образуется уплотненный слой металла, позволяющий в дальнейшем обеспечивать проч-

ные адгезионные связи с наносимым покрытием. В дальнейшем в условиях ударных нагрузок и абразивного изнашивания упрочненная поверхность будет обеспечивать высокую несущую способность покрытия за счет снижения возможности его деформации.

Анализируя полученные данные, можно отметить, что обработка колотой дробью приводит к образованию более выраженного микро рельефа, чем обработка кварцевым песком.



а) поверхность образца, обработанного колотой дробью



б) поверхность образца, обработанного кварцевым песком (фракция 0,25-0,31 мм)

Рис. 3. Поверхность образцов перед нанесением покрытия после холодной газодинамической обработки (увеличение $\times 125$ раз)
Fig. 3. The surface of the samples before coating after cold gas dynamic treatment (magnification $\times 125$ times)

При этом наблюдается значительная пластическая деформация поверхностного слоя с наличием более выраженных выровненных углублений и на отдельных участках кратеров значительной глубины неправильной формы. Это очевидно, связано с перенаклепом за счет многократных ударов частиц и образованием усталостных разрушений поверхностного слоя на отдельных уча-

стках поверхности. Для образца, обработанного кварцевым песком, это нехарактерно.

Данные факторы объясняются более высокой массой и кинетической энергией частиц колотой дробы по сравнению с частицами песка.

На рис. 4 представлены результаты определения твердости поверхности образцов до и после холодной газодинамической обработки.

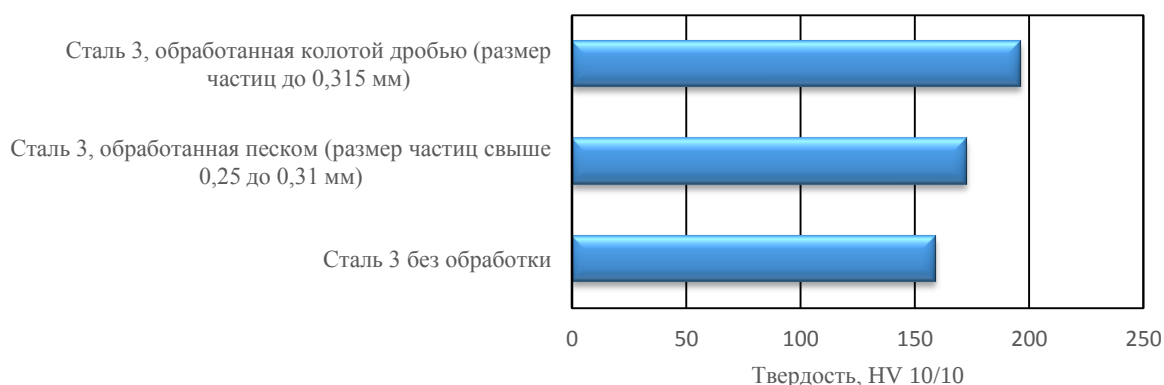


Рис. 4. Результаты определения твердости поверхности образцов
Fig. 4. Results of determination hardness of surface of samples

Результаты свидетельствуют о росте твердости поверхности образцов после их обработки как колотой дробью, так и кварцевым песком (прирост твердости составил для дробы на 23,3%, для песка на 9 %). Значительный рост твердости поверхности нецелесообразен, так как при дальнейшем нанесении покрытия образование закрепления частиц на поверхности будет затруднено. Кроме этого видно (см. рис.3), что при обработке дробью происходит частичное разрушение поверхностного слоя, а при обработке кварцевым песком формируется более предпочтительный микрорельеф для дальнейшего нанесения покрытия. Поэтому в дальнейшем для нанесения покрытия использовались образцы после обработки

кварцевым песком. На рис. 5 представлена микрфотография поверхностного слоя образца после обработки кварцевым песком.

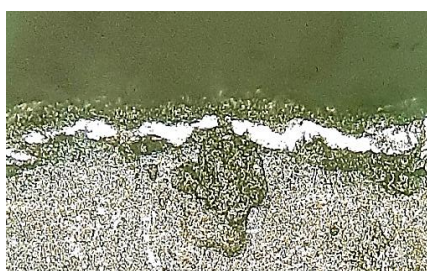
Активации поверхностного слоя, обеспечивающей более прочные адгезионные связи между наносимым покрытием и основным металлом детали способствует дополнительное введение в наносимый материал частиц корунда.

По данным различных исследователей введение в напыляемый материал твердых частиц (карбида бора, корунда, вольфрама и т.д.) способствует повышению толщины и прочности наносимого покрытия [9-12]. Исходя из этого исследовались порошки металлов, содержащие в своем составе частицы корунда.



Рис. 5. Микрофотография поверхностного слоя образца после обработки кварцевым песком (фракция 0,25-0,31 мм) (увеличение x200 раз)

Fig. 5. Micrograph of the surface layer of the sample after treatment with quartz sand (fraction 0.25-0.31 mm) (magnification x200 times)



а) поверхностный слой образца, после нанесения покрытия из порошка А-80-13



б) поверхностный слой образца, после нанесения покрытия из порошка А-30-01

Рис. 6. Микрофотографии поверхностного слоя образцов после нанесения покрытий (увеличение x200 раз)
Fig. 6. Micrographs of the surface layer of the samples after coating (magnification x200 times)

На рис.6 представлены микрофотографии поверхностных слоев образцов после нанесения на них покрытий. Как видно, на поверхности образца формируется сплошной слой из деформированных частиц наносимого порошка с включением твердых частиц корунда. При этом видно, что покрытие с алюминием более выровнено.

На толщину полученного слоя оказывает влияние давление потока газа, определяющее скорость движения частиц. На рис. 7 представлены результаты определения толщины покрытия в зависимости от изменения давления воздуха, подаваемого в сверхзвуковое сопло.

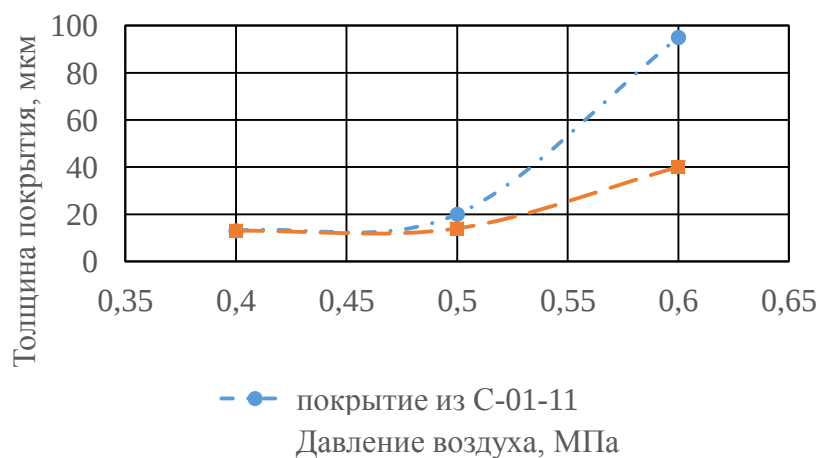


Рис. 7. Результаты определения толщины нанесенного покрытия
Fig. 7. Results of determining the thickness of the applied coating

Как показывают полученные данные при повышении давления воздуха происходит рост толщины наносимого покрытия. При изменении давления воздуха от 0,4 до 0,6 МПа для медьсодержащего покрытия отмечен более интенсивный рост толщины (в 7,3 раза) по сравнению с алюминийсодержащим (в 3,07 раза). Рост толщины покрытия при повышении давления связан увеличением скорости движения частиц, и, соответствен-

но большей кинетической энергией. В процессе нанесения покрытий с корундом на образце формируется металлокерамический слой, обладающий повышенной твердостью по сравнению с основным предварительно упрочненным металлом. На рис. 7 представлены результаты определения прироста твердости поверхностного слоя образцов после нанесения исследованных порошков.

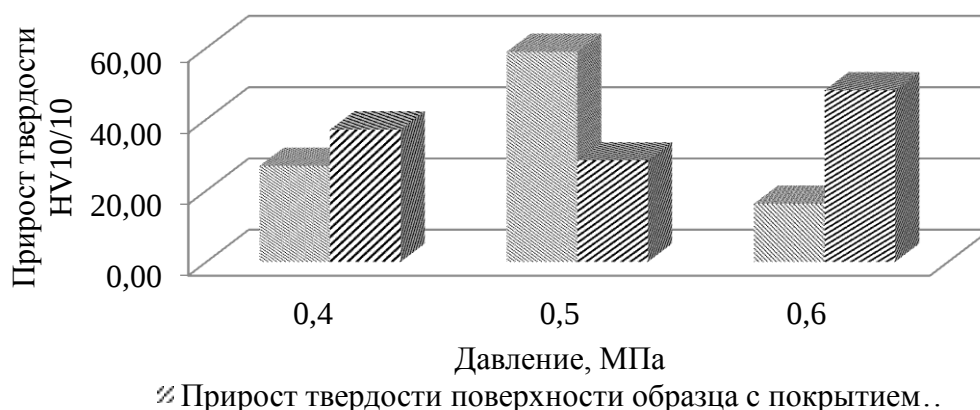


Рис. 8. Результаты определения прироста твердости поверхности образцов после нанесения покрытий
Fig. 8. Results of determining the growth in surface hardness of samples after coating

Как видно из представленных данных, прирост твердости по шкале Виккерса HV составил от 16 до 59 единиц. Характер изменения твердости от давления воздуха для различных покрытий отличается. Максимальная твердость для медьсодержащего покрытия наблюдалась при давлении 0,5 МПа, для алюминийсодержащего при давлении 0,6 МПа. Ресурс машины определяется в основном ресурсом рабочих органов и пар трения [13].

Для многих рабочих органов сельскохозяйственной техники характерно абразивное изнашивание. Твердость материала во многом определяет стойкость материала к условиям абразивного изнашивания. При увеличении твердости поверхностей трения повышается стойкость их к абразивному износу [14]. Поэтому для дальнейшего практического применения полученных покрытий были проведены исследования на стойкость их к условиям абразивного изнашивания.

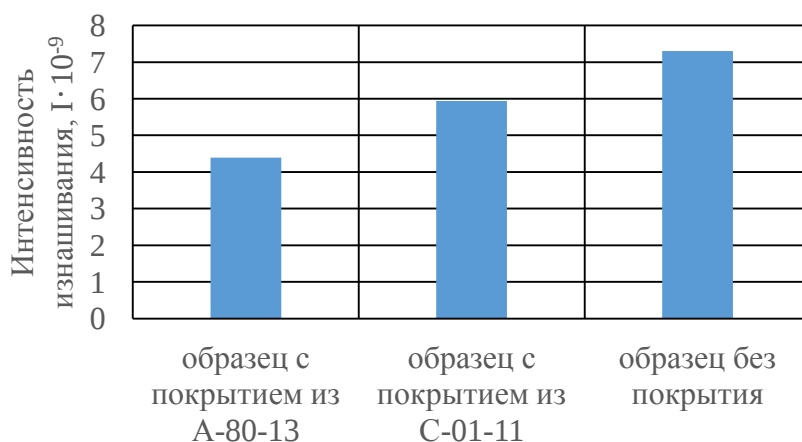


Рис. 9. Результаты определения интенсивности абразивного изнашивания образцов после нанесения покрытий
Fig. 9. Results of determining the intensity of abrasive wear of samples after coating

На рис. 9 представлены результаты определения интенсивности абразивного изнашивания в условиях трения образцов о незакрепленный абразив. Сформированные методом холодного газодинамического напыления покрытия отличаются более высокой износостойкостью по сравнению с основным упрочненным металлом. При этом в случае нанесения алюминийсодержащего покрытия интенсивность изнашивания образца снижается по сравнению с образцом без покрытия в 1,66 раза, при нанесении медьсодержащего покрытия снижение составило в 1,23 раза [15, 16].

ВЫВОДЫ

Нанесение алюминий и медьсодержащих покрытий холодным газодинамическим методом является эффективным способом упрочнения поверхности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Терентьев В.В., Аكوпова О.Б., Телегин И.А., Ельникова Л.В., Парунова Ю.М. Спектральные свойства карбоксилатов меди и опыт их применения в узлах трения сельскохозяйственной техники. *Аграрный вестник Верхневолжья*. 2019. № 1 (26). С. 79-84.
2. Терентьев В.В., Смирнов С.Ф., Максимовский Ю.М., Краснов А.А. Расчет начальной надежности деталей машин методом двух моментов. *Аграрный вестник Верхневолжья*. 2021. № 4 (37). С. 73-76.
3. Смирнов С.Ф., Терентьев В.В., Краснов А.А. Расчет на прочность вертикальных резервуаров на упруго-податливом основании. *Аграрный вестник Верхневолжья*. 2022. № 2 (39). С. 107-113. DOI 10.35523/2307-5872-2022-39-2-107-113.
4. Егоров И.Б., Поздняков Н.А., Шистеев А.В., Бураев М.К. Газодинамическое напыление изношенных поверхностей деталей машин. *Актуальные вопросы аграрной науки*. 2024. № 3 (52). С. 8-18. DOI: 10.51215/2411-6483-2024-52-8-18.
5. Алхимов А.П., Клинков С.В., Косарев В.Ф., Фомин В.М. Холодное газодинамическое напыление: теория и практика. Под ред. В.М. Фомина. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. 536 с.
6. Бодров Е.Г., Серебряков И.С., Латфулина Ю.С., Напримерова Е.Д., Мясоедов В.А., Самодурова М.Н. Математическое моделирование процесса холодного газодинамического напыления порошковых цветных металлов. *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2023. Т. 21. № 4. С. 148-156. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-4-148>.
7. Клинков С.В., Косарев В.Ф., Шикалов В.С. Эволюция температуры подложки при движении сопла в условиях холодного газодинамического напыления. *Теплофизика и аэромеханика*. 2021. Т. 28. № 4. С. 569-584.
8. Терентьев В.В., Шатило П.Г. Установка для антикоррозионной защиты наружных поверхностей техники. Сборник материалов X Всероссийской научно-практической конф. «Надежность и долговечность машин и механизмов». Иваново: ФГБОУ ВО Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России. 2019. С. 547-550.

Данный метод можно рекомендовать для реализации при восстановлении деталей, работающих в условиях абразивного изнашивания (рабочие органы почвообрабатывающих машин, дробилок, измельчителей и т.д.).

Подбирая параметры нанесения можно формировать качественные покрытия различной толщины. Эффективным методом, позволяющим повышать прочность покрытия и подложки можно считать предварительную обработку металлической поверхности перед нанесением покрытия кварцевым песком.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.

REFERENCES

1. Terentyev V.V., Akopova O.B., Telegin I.A., Yelnikova L.V., Parunova Yu.M. Spectral properties of copper carboxylates and experience of their application in friction units of agricultural machinery. *Agrarian Bulletin of the Upper Volga region*. 2019. N 1 (26). P. 79-84.
2. Terentyev V.V., Smirnov S.F., Maksimovsky Yu.M., Krasnov A.A. Calculation of the initial reliability of machine parts using the two-moment method. *Agrarian Bulletin of the Upper Volga region*. 2021. N 4 (37). P. 73-76.
3. Smirnov S.F., Terentyev V.V., Krasnov A.A. Calculation of the strength of vertical tanks on an elastically malleable base. *Agrarian Bulletin of the Upper Volga region*. 2022. N 2 (39). P. 107-113. DOI 10.35523/2307-5872-2022-39-2-107-113.
4. Egorov I.B., Pozdnyakov N.A., Shisteev A.V., Buraev M.K. Gas dynamic spraying of worn surfaces of machine parts. *Current issues of agricultural science*. 2024. N 3 (52). P. 8-18. DOI: 10.51215/2411-6483-2024-52-8-18.
5. Alhimov A.P., Klinkov S.V., Kosarev V.F., Fomin V.M. Cold gas dynamic spraying. theory and practice. Pod red. V.M. Fomina. M.: FIZMATLIT. 2009. 536 p.
6. Bodrov E.G., Serebryakov I.S., Latfulina Yu.S., Naprimerova E.D., Myasoedov V.A., Samodurova M.N. Mathematical modeling of the process of cold gas dynamic spraying of powdered non-ferrous metals. *Bulletin of Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov*. 2023. V. 21. N 4. P. 148-156. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-4-148>
7. Klinkov S.V., Kosarev V.F., Shikalov V.S. Evolution of the substrate temperature during nozzle movement under conditions of cold gas dynamic spraying. *Thermophysics and aeromechanics*. 2021. V. 28. N 4. P. 569-584.
8. Terentyev V.V., Shatilo P.G. Installation for anticorrosive protection of external surfaces of machinery. Collection of materials of the X All-Russian Scientific and practical Conference "Reliability and durability of machines and mechanisms". Ivanovo: Ivanovo Fire and Rescue Academy of the Ministry of Emergency Situations of Russia. 2019. P. 547-550.
9. Kosarev V.F., Shikalov V.S., Fuad M.G., Vidyuk T.M., Klinkov S.V. Structure and properties of composite coatings formed by cold gas dynamic spraying of mixtures of aluminum powders and boron carbide. *Siberian Physical Journal*. 2022. V. 17. N 3. P. 47-52. DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-3-47-52.

9. Косарев В.Ф., Шикалов В.С., Фуад М.Г., Видюк Т.М., Клиников С.В. Структура и свойства композиционных покрытий, формируемых методом холодного газодинамического напыления смесей порошков алюминия и карбида бора. *Сибирский физический журнал*. 2022. Т. 17. № 3. С. 47-52. DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-3-47-52.
10. Козлов И.А., Никифоров А.А., Демин С.А., Вдовин А.И. Использование металло-порошковой композиции системы цинк-алюминий для нанесения защитного покрытия методом холодного газодинамического напыления. *Труды ВИАМ*. 2022. № 7 (113). С. 08. <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-7-89-98.
11. Балданов К.П., Буряев М.К., Рязанов П.Г. К расчету параметров холодного газодинамического напыления деталей машин с использованием установки ДИМЕТ-405. *Вестник ВСУТУ*. 2019. № 1 (72). С. 69-73.
12. Латфулина Ю.С., Дубенская М., Самодурова М.Н., Трофимов Е.А., Барков Л.А. Реализация процесса нанесения покрытия медь-вольфрам методом холодного газодинамического напыления. *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2021. Т. 19. № 2. С. 40-49. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-2-40-49>.
13. Горунев А.И. Исследование упрочненного многослойного покрытия, полученного методом холодного газодинамического напыления с использованием лазера. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2020. Т. 86. № 7. С.33-38. DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2020-86-7-33-38>.
14. Терентьев В. В., Лапшин В. Б., Субботин К. В., Богданов В. С. Повышение ресурса узлов трения почвообрабатывающей техники. *Научное обозрение*. 2011. № 6. С.27-31.
15. Терентьев В. В., Краев Д. Е. Исследование влияния режимов электроискровой обработки на твердость поверхности нержавеющей стали Сборник материалов IX Всероссийской научно-практической конф. «Надежность и долговечность машин и механизмов». Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России. 2018. С. 244-247.
16. Блиничев В.Н., Лабутий А.Н., Зуева Г.А., Колобов М.Ю., Алексеев Е.А., Волкова Г.В., Воробьев С.В., Козлов А.М., Кокурина Г.Н., Лысова М.А., Миронов Е.В., Натарева С.В., Невиницын В.Ю., Пономарева Ю.Н., Постникова И.В., Сахаров С.Е., Чагин О.В. Проблемы разработки энерго- и ресурсосберегающих процессов, реакторных систем и оборудования интенсивного действия, моделирования и оптимального управления. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2023. Т. 66. вып. 7. С. 185-202. DOI:10.6060/ivkkt.20236607.6845j
10. Kozlov I.A., Nikiforov A.A., Demin S.A., Vdovin A.I. The use of a zinc-aluminum metal-powder composition for applying a protective coating by cold gas-dynamic spraying. *Proceedings of VIAM*. 2022. N 7 (113). P. 08. <http://www.viam-works.ru> DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-7-89-98.
11. Baldanov K.P., Buraev M.K., Ryazanov P.G. Calculation of parameters of cold gas dynamic spraying of machine parts using the DIMET-405 installation. *Bulletin of VSGUTU*. 2019. N 1 (72). P. 69-73.
12. Latfulina Yu.S., Dubenskaya M., Samodurova M.N., Trofimov E.A., Barkov L.A. Implementation of the copper-tungsten coating process by cold gas dynamic spraying. *Bulletin of Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov*. 2021. V. 19. N 2. P. 40-49. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-2-40-49>.
13. Gorunov A.I. Investigation of a reinforced multilayer coating obtained by cold gas-dynamic spraying using a laser. *Factory laboratory. Diagnostics of materials*. 2020. V. 86. N 7. P. 33-38. DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2020-86-7-33-38>.
14. Terentyev V.V., Lapshin V.B., Subbotin K.V., Bogdanov V.S. Increasing the resource of friction units of tillage machinery. *Scientific Review*. 2011. N 6. P. 27-31.
15. Terentyev V.V., Kraev D.E. Investigation of the effect of electric spark treatment modes on the surface hardness of stainless steel Collection of materials of the IX All-Russian Scientific and Practical Conference "Reliability and durability of machines and mechanisms". Ivanovo: Ivanovo Fire and Rescue Academy of the Ministry of Emergency Situations of Russia. 2018. P. 244-247.
16. Blinichev V.N., Labutin A.N., Zueva G.A., Kolobov M.Yu., Alekseev E.A., Volkova G.V., Vorobyov S.V., Kozlov A.M., Kokurina G. N., Lysova M.A., Mironov E.V., Natareev S.V., Nevitsyn V.Yu., Ponomareva Yu. N., Postnikova I.V., Sakharov S.E., Chagin O.V. Problems of developing energy- and resource-saving processes, reactor systems and intensive equipment, modeling and optimal control. *ChemChemTech [Izv. Vyssh.Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2023. V. 66. issue 7. P. 185-202. DOI:10.6060/ivkkt.20236607.6845j

Поступила в редакцию(Received) 13.12.2025
Принята к опубликованию (Accepted) 10.02.2026