

Научная статья

УДК 620.193

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31411>



С.А. Блинов, А.М. Левитский , О.Г. Зотов, Н.А. Голубков

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

 levitskij_am@spbstu.ru

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ МЕДНОГО И АЛЮМИНИЕВОГО ПОРОШКОВЫХ ПОКРЫТИЙ, НАНЕСЕННЫХ МЕТОДОМ ХОЛОДНОГО ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ

Аннотация. В работе были проведены сравнительные испытания покрытий, нанесенных на СтЗсп методом холодного газодинамического напыления (ХГДН). В работе использовали установку «Димет-405». В качестве материала для напыления выбрали готовые смеси фирмы «Димет»: медная С-01-01, алюминиевая с добавлением цинка А-80-13. После нанесения образцы подверглись механическим и коррозионным испытаниям в камере соляного тумана и контейнерах с морской водой. Оценка коррозионной стойкости покрытий проводили по изменению веса образцов, что также позволило рассчитать скорость коррозии. Полученные результаты были подтверждены металлографическим анализом и визуальным контролем. Наибольшую коррозионную устойчивость продемонстрировало покрытие из смеси алюминия и цинка. Окисления основного металла образца замечено не было. Устойчивость к растрескиванию при изгибе также выше у покрытия на основе алюминия и цинка.

Ключевые слова: коррозия, медь, алюминий, ХГДН, коррозионностойкое покрытие.

Для цитирования:

Блинов С.А., Левитский А.М., Зотов О.Г., Голубков Н.А. Сравнительные испытания коррозионной стойкости медного и алюминиевого порошковых покрытий, нанесенных методом холодного газодинамического напыления // Глобальная энергия. 2025. Т. 31, № 4. С. 146–158. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31411>



S.A. Blinov, A.M. Levitsky ✉, *O.G. Zotov, N.A. Golubkov*

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

✉ levitskij_am@spbstu.ru

COMPARATIVE CORROSION RESISTANCE TESTS OF COPPER AND ALUMINUM POWDER COATINGS APPLIED BY COLD GAS DYNAMIC SPRAYING

Abstract. The study conducted comparative tests of coatings deposited on St3sp steel using Cold Gas Dynamic Spraying (CGDS) method. The experiments were carried out using a “Dimet-405” system. Ready-made powder mixtures from “Dimet” were chosen as the material for spraying: copper C-01-01 and aluminum with the addition of zinc A-80-13. After deposition, the samples were subjected to mechanical and corrosion tests in a salt spray chamber and in containers with seawater. The corrosion resistance of the coatings was assessed by measuring the change in the weight of the samples, which also allowed for the calculation of the corrosion rate. The results were confirmed by metallographic analysis and visual inspection. The coating made of a mixture of aluminum and zinc demonstrated the highest corrosion resistance. No oxidation of the base metal of the sample was observed. The resistance to cracking during bending was also higher for aluminum–zinc based coatings.

Keywords: corrosion, copper, aluminium, Cold Gas Dynamic Spraying, corrosion-resistant coating.

Citation:

Blinov S.A., Levitsky A.M., Zotov O.G., Golubkov N.A., Comparative corrosion resistance tests of copper and aluminum powder coatings applied by cold gas dynamic spraying, *Global Energy*, 31 (04) (2025) 146–158, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31411>

Введение. Одним из основных способов защиты различных узлов и механизмов от коррозионного воздействия является нанесение защитных покрытий.

Первым упоминаниям о подобных способах защиты материала более 1000 лет. При этом наиболее предпочтительными являются методы, не оказывающие термического влияния на основной материал, что позволяет сохранить его исходные свойства. Одним из таких способов является холодное газодинамическое напыление (ХГДН).

В основе метода лежит эффект, основанный на развитии большой кинетической энергии частицы. При ударе о подложку частица прилипает к ней без оплавления [1–8]. В ходе напыления существуют различные варианты взаимодействия частицы с подложкой: эрозионный износ материала подложки, внедрение и деформация частицы с последующим формированием адгезионного контакта на поверхности. На рис. 1 показана принципиальная схема такого взаимодействия между частицами меди и подложкой из алюминия [9–12]. По итогу получается беспористое и сплошное покрытие. В работе [13] показаны результаты математического моделирования соударения различных материалов методом молекулярной динамики.

На сегодняшний день актуальным вопросом является применение технологии ХГДН при нанесении антикоррозионных покрытий. В связи с этим в нашей работе были исследованы коррозионные и механические свойства типовых порошковых смесей для нанесения покрытий по этой технологии.

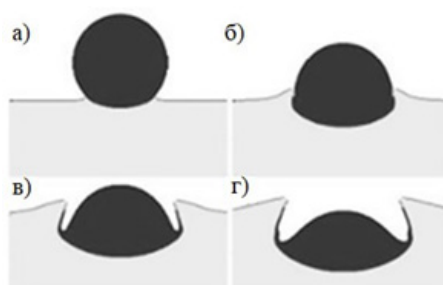


Рис. 1. Схема взаимодействия медной частицы с алюминиевой подложкой при напылении методом ХГДН:

- а) эрозионный износ материала подложки; б) внедрение без деформации частицы;
в) внедрение и деформация частицы; г) формирование адгезионного контакта на поверхности

Fig. 1. Schematic diagram of the interaction between a copper particle and an aluminum substrate during deposition by the Cold Gas Dynamic Spraying (CGDS) method: a) erosive wear of the substrate material; b) particle embedding without deformation; c) particle embedding and deformation; d) formation of an adhesive contact on the surface

Материалы и методика

Исследования проводились на образцах стали марки Ст3сп 100×20×3 мм. Химический состав стали приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав стали Ст3сп

Table 1

Chemical composition of St3sp steel

Содержание элементов, масс. %							
C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu
0,164	0,210	0,405	0,003	0,005	0,030	0,039	0,012

Для нанесения покрытий использовали установку ХГДН низкого давления «Димет-405», так как напыляемые металлы обладают высокой пластичностью (рис. 2).

В работе рассмотрены два вида покрытий:

- 1) медное, для него использовался порошок С-01-01, состоящий из медного порошка с добавлением корунда;
- 2) алюминиевое, для него взята смесь А-80-13, в ее составе порошок основа – алюминий, добавка в виде цинка и корунда.

Добавление в смесь для ХГДН частиц карбида кремния SiC или же корунда Al_2O_3 активирует поверхность подложки, повышает адгезионные свойства и позволяет получить более плотное и сплошное покрытие [14–16].

Также для использованных в исследовании смесей были определены технологические характеристики. Морфологию частиц определили на сканирующем электронном микроскопе Carl Zeiss Supra 40VP, применив метод съемки во вторичных электронах. Для определения гранулометрического состава использовали лазерный анализатор размера частиц Fritsch Analysette 22 NanoTec plus.

Нанесение покрытий осуществлялось вручную для приближения к реальным условиям использования подобной установки. Стальные пластины при помощи установки «Димет-405»



Рис. 2. Установка холодного газодинамического напыления с низким давлением «Димет-405»

Fig. 2. Low-pressure CGDS unit “Dimet-405”

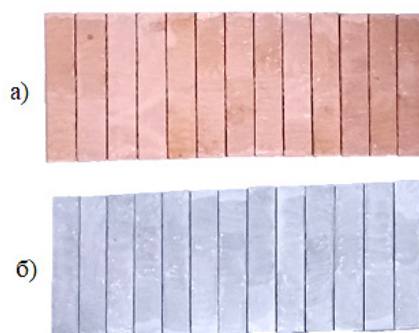


Рис. 3. Общий вид образцов после нанесения:

а) образцы из Ст3 + ХГДН С-01-01; б) образцы из Ст3 + ХГДН А-80-13

Fig. 3. General view of the manufactured samples after deposition:

а) steel samples + CGDS C-01-01; б) steel samples + CGDS A-80-13

были подвергнуты абразивной обработке порошком электрокорунда к-00-04-02. Это процедура позволяет получить необходимую шероховатость, что обеспечивает улучшение адгезии. Для нанесения покрытий была выбрана температура 440°C. Полученные образцы представлены на рис. 3.

Проводились коррозионные испытания в камере соляного тумана, в морской воде, а также циклическое испытание «туман – воздух». Продолжительность каждого из испытаний составила 720 часов. После испытаний проводился визуальный контроль и взвешивание образцов для определения скорости коррозии. Расчет проводился исходя из данных об изменении массы образцов в ходе испытаний по следующей формуле:

$$r'_{corr} = \frac{\Delta m}{A \cdot \rho \cdot t'},$$

где r'_{corr} — скорость коррозии, мкм/год; ρ — плотность металла, г/см³; Δm — изменение массы, г; A — площадь поверхности, м²; t — время выдержки, годы.

Испытание на трехточечный изгиб проводилось на испытательной машине Zwick/Roell Z100. Испытание продолжалось до тех пор, пока в покрытии не образовывалось трещин. В этот момент фиксировался угол изгиба.

Металлографическое исследование стальных пластин с коррозионностойкими покрытиями проводилось на оптическом микроскопе Leica DMI 5000. На шлифах проводилось измерение толщины покрытия.

Анализ результатов

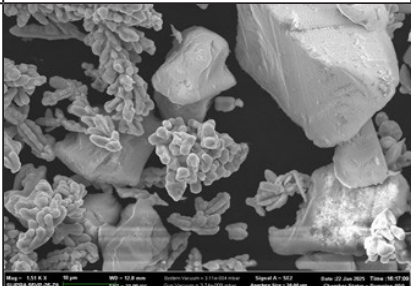
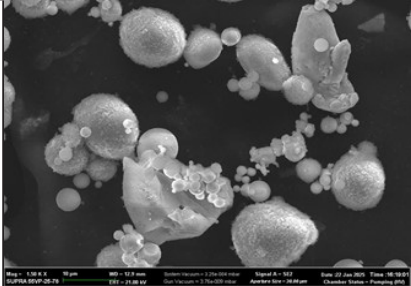
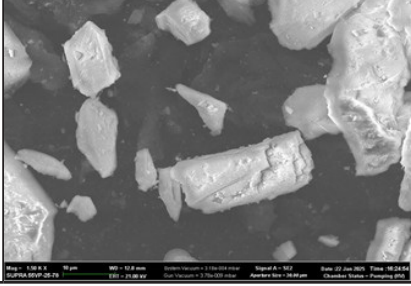
Результаты исследований морфологии и гранулометрического состава приведены в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Морфология частиц (увеличение x1,5K)

Table 2

Morphology of particles (1.5K magnification)

Название порошка	Фото частиц	Форма частиц
С-01-01		Дендритная (частицы меди) / осколочная (частицы корунда)
А-80-13		Сферическая (частицы алюминия и цинка) / осколочная (частицы корунда)
К-00-04-02		Осколочная (частицы корунда)

Основная фракция во всех исследованных порошках – 40–60 мкм, а форма частиц различна. Следовательно, можно предположить, что при создании порошковых смесей для нанесения покрытий методом ХГДН следует уделять внимание основной фракции смеси, в то время как форма частиц, по-видимому, не играет существенной роли.

В табл. 4 приведены результаты испытаний на трехточечный изгиб.

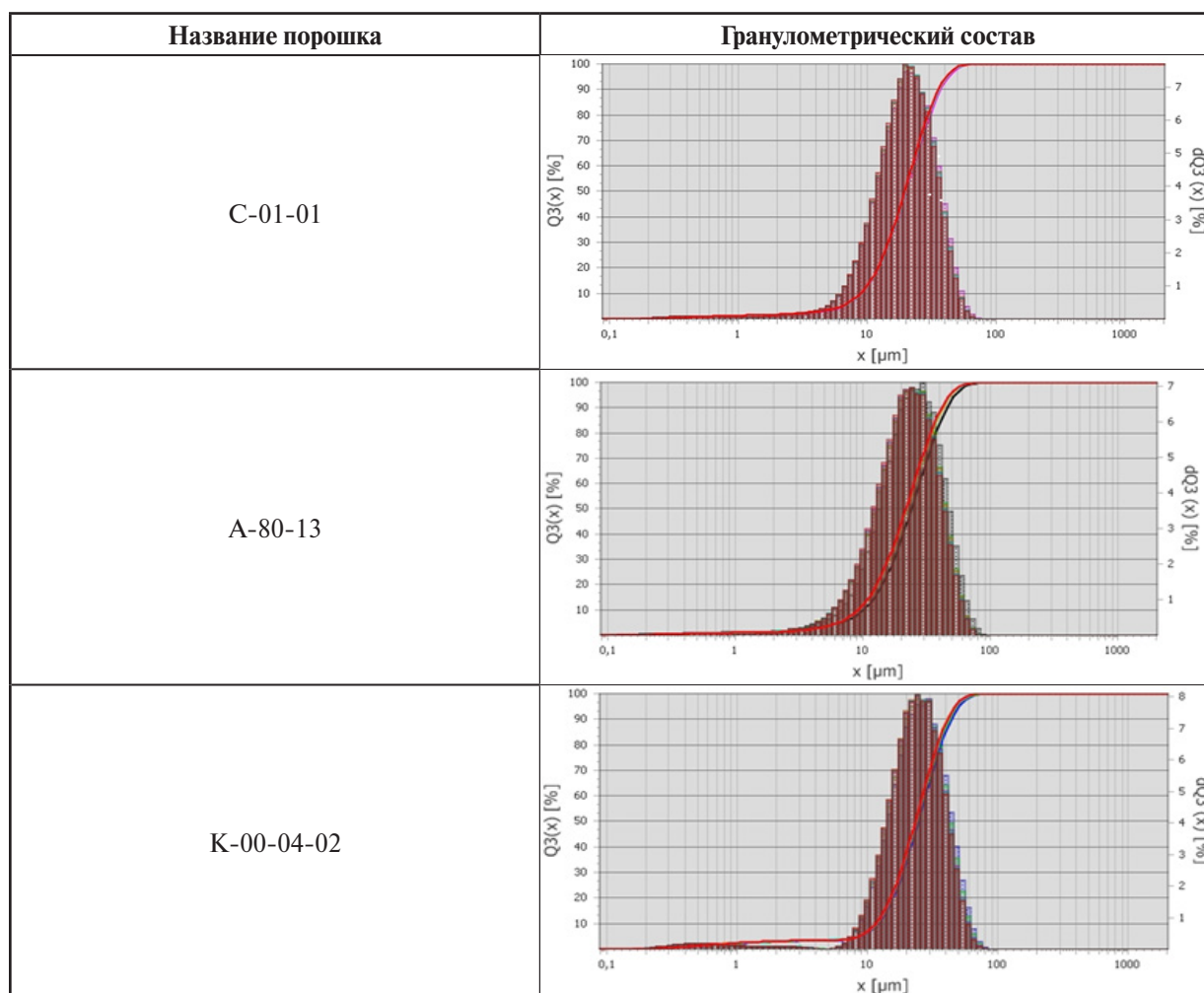
Видно, что покрытие на основе смеси алюминия и цинка показало большую устойчивость к трещинообразованию при трехточечном изгибе, нежели покрытие на основе меди. Хотя медь и является одним из самых пластичных металлов, существует вероятность, что выбранная температура нанесения не обеспечивает формирование высоких пластических свойств для покрытия на основе меди.

Таблица 3

Гранулометрический состав порошков

Table 3

Granulometric composition of powders



На рис. 4 показан внешний вид образцов после коррозионных испытаний в сравнении с видом образцов, хранившихся в эксикаторе. Скорости коррозии показаны в табл. 5.

Исходя из полученных данных следует, что покрытие на основе алюминия и цинка показало лучшую по сравнению с покрытием на основе меди коррозионную стойкость во всех видах испытаний. Об этом можно судить по дефектности покрытия и по количеству оксидов железа характерного коричнево-оранжевого цвета. На образцах с медным покрытием заметно большое количество участков именно такого цвета, в то время как на образцах с алюминиево-цинковым покрытием таких участков значительно меньше. При этом вычисленные скорости коррозии говорят, что образцы с медным покрытием в некоторых случаях прокорродировали меньше.

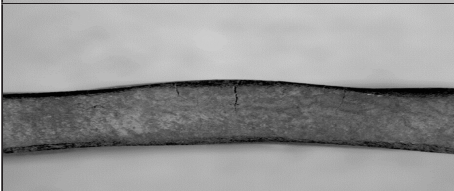
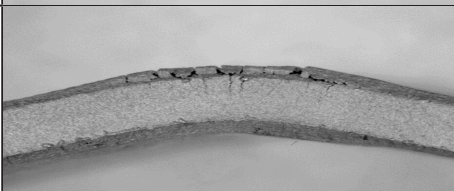
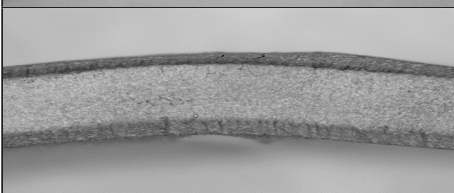
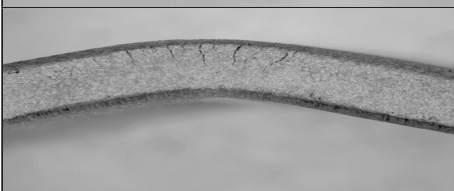
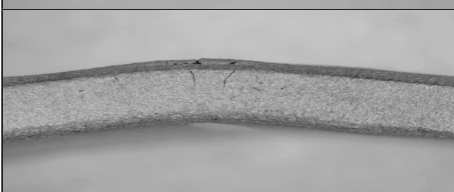
В табл. 6 показаны фотографии структуры покрытий образцов из эксикатора, а также образцов после коррозионных испытаний. Аналогичные фотографии для алюминиевого покрытия показаны в табл. 7.

Таблица 4

Вид образцов после проведения механических испытаний

Table 4

Samples after mechanical testing

Материал покрытия	Вид трещин на покрытии	Угол загиба, °	Толщина покрытия, мкм
С-01-01		19	135
		9	199
		13	127
		9	87
А-80-13		38	216
		19	232
		36	50
		20	189,5

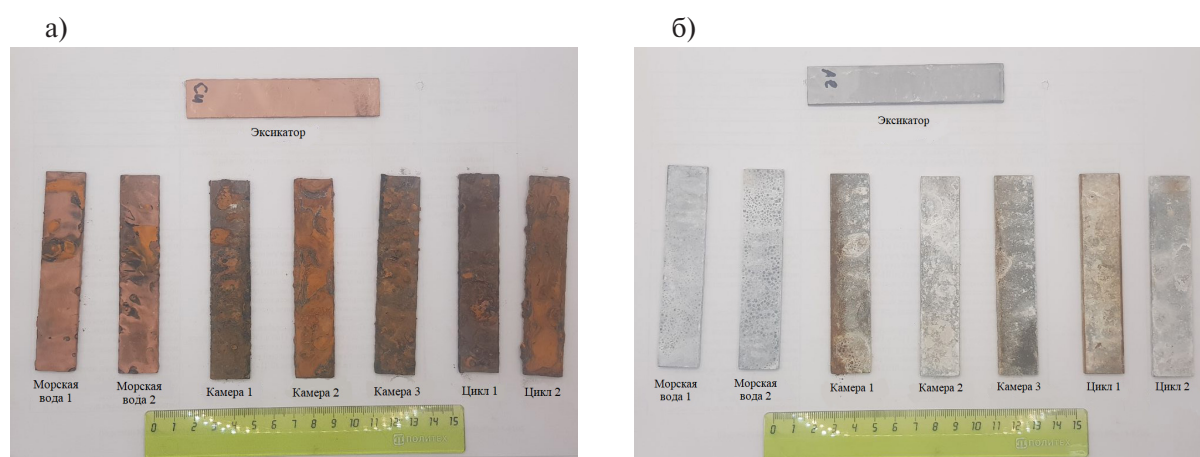


Рис. 4. Общий вид образцов после коррозионных испытаний:
а) образцы Ст3 + ХГДН С-01-01; б) образцы Ст3 + ХГДН А-80-13

Fig. 4. General view of the samples after corrosion testing:
a) steel samples + CGDS C-01-01; b) steel samples + CGDS A-80-13

Таблица 5

Скорости коррозии в условиях коррозионных испытаний

Table 5

Corrosion rates under corrosion testing conditions

№ п/п	Тип покрытия	Скорость коррозии, мм/год		
		Соляной туман	Морская вода	Циклическое
1	Cu	0,0053	0,0860	0,0293
2		0,1206	0,2762	0,0182
3		0,0112	—	—
4	Al	0,1334	0,1235	0,0772
5		0,1514	0,1458	0,0832
6		0,1011	—	—

Металлографическое исследование показало, что покрытие на основе алюминия и цинка лучше прилегает к подложке. После испытаний дефектов на границе с основным металлом не обнаружено. В то время как на образцах с медным покрытием заметно, развитое в разной степени, расслоение покрытия и основного металла.

Обсуждение

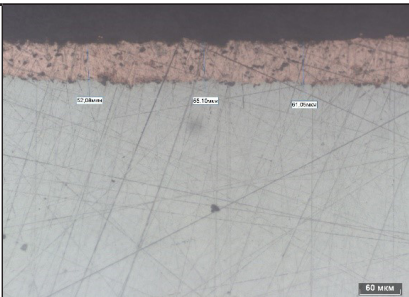
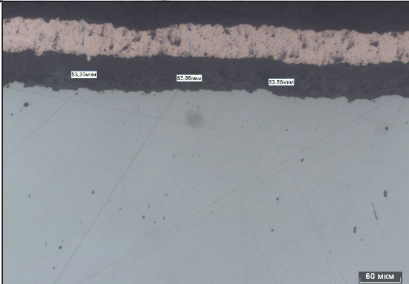
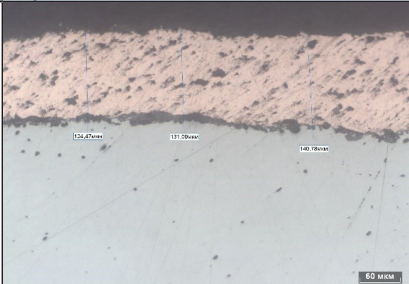
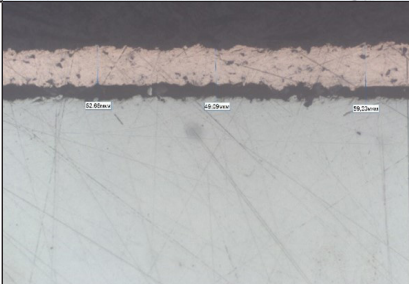
Актуальным является вопрос определения скорости коррозии. Данный параметр является важным при планировании срока службы различных конструкций. Определение скорости коррозии по изменению массы образца содержит ряд сложностей. В процессе испытания имеют место следующие явления: окисление материала покрытия, частичное растворение покрытия, взаимодействие основного металла с реагентом в местах повреждения покрытия, сопровождающееся осаждением продуктов взаимодействия на образец. Существующие методики предусматривают удаление продуктов коррозии щеткой перед взвешиванием, однако не все окислы возможно удалить таким способом, а при более активной обработке поверхности существует риск снять неповрежденный материал. Это обстоятельство указывает на необходимость

Таблица 6

Образцы с медным покрытием

Table 6

Copper coated samples

Исходный образец		Средняя толщина слоя покрытия составила 56,08 мкм.
Испытания при воздействии нейтрального соляного тумана		Средняя толщина слоя покрытия составила 53,65 мкм. Под покрытием обнаружен слой окислов, что говорит о наличии в нем сквозных дефектов.
Циклические испытания «нейтральный соляной туман – воздух»		Средняя толщина слоя покрытия составила 132,11 мкм. Под покрытием обнаружен слой окислов, что говорит о наличии в нем сквозных дефектов.
Испытание в морской воде		Средняя толщина слоя покрытия составила 53,66 мкм. Под покрытием присутствует равномерный слой окислов. Причина его образования – несплошности в покрытии.

доработки существующих методик или разработки альтернативных для получения более точных расчетных скоростей коррозии. В частности, перспективным выглядит сочетание ускоренных коррозионных испытаний с электрохимическими методами исследования [17].

Заключение

В результате проведенных коррозионных испытаний на стальных пластинах, покрытых смесью из алюминия и цинка, не обнаружено окислов основного металла.

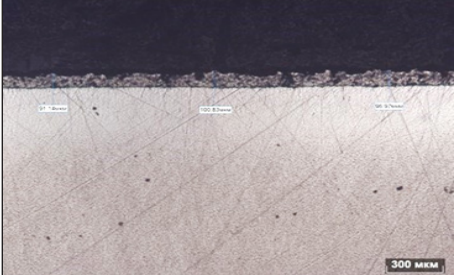
Установлено, что на образцах, покрытых медью, очаги коррозии основного металла появились менее чем через 96 часов с начала испытаний. На это оказали влияние следующие факторы:

Таблица 7

Образцы с алюминиевым покрытием

Table 7

Aluminum coated samples

Исходный образец		Средняя толщина слоя покрытия составила 164,14 мкм. Покрытие нанесено равномерно.
Испытания при воздействии нейтрального соляного тумана		Средняя толщина слоя покрытия составила 125,25 мкм. Заметно небольшое истончение покрытия. Сквозных дефектов в покрытии нет. Покрытие плотно прилегает к основному материалу.
Циклические испытания «нейтральный соляной туман — воздух»		Средняя толщина слоя покрытия составила 196,19 мкм. Заметно небольшое истончение покрытия. Несплошностей в покрытии нет. Покрытие плотно прилегает к стали.
Испытание в морской воде		Средняя толщина слоя покрытия составила 91,02 мкм. Заметно небольшое истончение покрытия. Сквозных дефектов в покрытии нет. Адгезия покрытия и основного материала хорошая.

1) алюминий и цинк служат протекторами, то есть их электрохимические потенциалы ниже, чем у железа, что обуславливает их растворение в процессе электрохимической коррозии взамен стали;

2) металлографическое исследование показало, что при ручном нанесении алюминиево-цинковая смесь ложится на сталь более равномерно, чем смесь из меди. Соответственно покрытие получается более сплошным и беспористым.

Помимо превосходства в коррозионной стойкости покрытие на основе алюминия и цинка показало лучшие пластические свойства. Трещины в покрытии на основе меди образовывались при среднем угле изгиба $12,5^\circ$ против $28,3^\circ$ у покрытия на основе алюминия и цинка. Низкая пластичность покрытия на основе меди предположительно связана с неверным выбором температуры нанесения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Reshetniak V., Reshetniak O., Aborkin A., Nederkin V., Filippov A.** Effect of the Interface on the Compressibility of Substances with Spherical Nano-Inhomogeneities on the Example of Al/C₆₀, *Nanomaterials*, 12 (12) (2022) 2045. DOI: 10.3390/nano12122045
- [2] **Aborkin A., Babin D., Belyaev L., Bokaryov D.** Enhancing the Microhardness of Coatings Produced by Cold Gas Dynamic Spraying through Multi-Reinforcement with Aluminum Powders Containing Fullerenes and Aluminum Nitride, *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 7 (6) (2023) 203. DOI: 10.3390/jmmp7060203
- [3] **Adaan-Nyia M.A., Tiamiyu A.A.** Recent advances on bonding mechanism in cold spray process: A review of single-particle impact methods, *Journal of Materials Research*, 38 (2023) 69–95. DOI: 10.1557/s43578-022-00764-2
- [4] **Алхимов А.П., Клинков С.В., Косарев В.Ф., Фомин В.М.** Холодное газодинамическое напыление. Теория и практика. М.: Физматлит, 2010. 536 с.
- [5] **Алхимов А.П., Гулидов А.И., Косарев В.Ф., Нестерович Н.И.** Особенности деформирования микрочастиц при ударе о твердую преграду // *Прикладная механика и техническая физика*. 2000. Т. 41, № 1. С. 204–209.
- [6] **Ghelichi R., Bagherifard S., Guagliano M., Verani M.** Numerical simulation of cold spray coating, *Surface and Coatings Technology*, 205 (23–24) (2011) P. 5294–5301. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2011.05.038
- [7] **Assadi H., Gärtner F., Stoltenhoff T., Kreye H.** Bonding mechanism in cold gas spraying, *Acta Materialia*, 51 (15) (2003) 4379–4394. DOI: 10.1016/S1359-6454(03)00274-X
- [8] **King P.C., Bae G., Zahiri S.H., Jahedi M., Lee C.** An experimental and finite element study of cold spray copper impact onto two aluminum substrates, *Journal of Thermal Spray Technology*, 19 (2010) 620–634. DOI: 10.1007/s11666-009-9454-7
- [9] **King P., Vucko M., Poole A.J., Jahedi M., de Nys R.** Cold spray antifouling of marine seismic streamers. Режим доступа: <https://publications.csiro.au/rpr/download?pid=csiro:EP124574&dsid=DS1> (дата обращения: 07.03.2020).
- [10] **Vucko M.J., King P.C., Poole A.J., Carl C., Jahedi M.Z., de Nys R.** Cold spray metal embedment: an innovative antifouling technology, *Biofouling*, 28 (3) (2012) 239–248. DOI: 10.1080/08927014.2012.670849
- [11] **Moridi A., Hassani-Gangaraj S.M., Guagliano M.** A hybrid approach to determine critical and erosion velocities in the cold spray process, *Applied Surface Science*, 273 (2013) 617–624. DOI: 10.1016/j.apsusc.2013.02.089
- [12] **Козлов И.А., Лещев К.А., Никифоров А.А., Демин С.А.** Холодное газодинамическое напыление покрытий (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2020. Т. 90, № 8. С. 77–93. DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-77-93
- [13] **Белай О.В., Киселев С.П., Киселев В.П.** Численное моделирование методом молекулярной динамики соударения наночастицы с преградой в условиях холодного газодинамического напыления // *Прикладная механика и техническая физика*. 2023. Т. 64, № 6 (382), С. 27–35. DOI: 10.15372/PMTF202315303
- [14] **Schmidt T., Assadi H., Gärtner F., Richter H., Stoltenhoff T., Kreye H., Klassen T.** From particle acceleration to impact and bonding in cold spraying, *Journal of Thermal Spray Technology*, 18 (2009) 794–808. DOI: 10.1007/s11666-009-9357-7
- [15] **Prusov E.S., Deev V.B., Shurkin P.K., Arakelian S.M.** The effect of alloying elements on the interaction of boron carbide with aluminum melt, *Non-ferrous Metals*, 1 (2021) 27–33. DOI: 10.17580/nfm.2021.01.04
- [16] **Aborkin A.V., Babin D.M., Elkin A.I., Ryabkova V.V.** Microhardness of gas-dynamic coatings from aluminum powder multi-reinforced with fullerenes and aluminum oxide, *Non-ferrous Metals*, 2 (2024) 52–57. DOI: 10.17580/nfm.2024.02.08

[17] Козлов И.А., Никифоров А.А., Демин С.А., Вдовин А.И. Использование металлопорошковой композиции системы цинк—алюминий для нанесения защитного покрытия методом холодного газодинамического напыления. Труды ВИАМ. 2022. Т. 7, № 113. С. 89–98. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-7-89-98

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

БЛИНОВ Святослав Алексеевич — инженер, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: blinov_sa@spbstu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-2017-8249>

ЛЕВИТСКИЙ Алексей Максимович — инженер, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: levitskij_am@spbstu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7900-4007>

ЗОТОВ Олег Геннадьевич — доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.

E-mail: zog-58@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3243-4359>

ГОЛУБКОВ Никита Александрович — ведущий инженер, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: golubkov-na@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-6785-1444>

REFERENCES

- [1] V. Reshetniak, O. Reshetniak, A. Aborkin, V. Nederkin, A. Filippov, Effect of the Interface on the Compressibility of Substances with Spherical Nano-Inhomogeneities on the Example of Al/C60, *Nanomaterials*, 12 (12) (2022) 2045. DOI: 10.3390/nano12122045
- [2] A. Aborkin, D. Babin, L. Belyaev, D. Bokaryov, Enhancing the Microhardness of Coatings Produced by Cold Gas Dynamic Spraying through Multi-Reinforcement with Aluminum Powders Containing Fullerenes and Aluminum Nitride, *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 7 (6) (2023) 203. DOI: 10.3390/jmmp7060203
- [3] M.A. Adaan-Nyiah, A.A. Tiamiyu, Recent advances on bonding mechanism in cold spray process: A review of single-particle impact methods, *Journal of Materials Research*, 38 (2023) 69–95. DOI: 10.1557/s43578-022-00764-2
- [4] A.P. Alkhimov, S.V. Klinkov, V.F. Kosarev, V.M. Fomin, *Kholodnoe gazodinamicheskoe napylenie. Teoriia i praktika* [Cold Gas Spraying: Theory and Practice]. Moscow: Fizmatlit, 2010. 536 p.
- [5] A.P. Alkhimov, A.I. Gulidov, V.F. Kosarev, N.I. Nesterovich, Osobennosti deformirovaniia mikrochastits pri udare o tverduiu pregradu [Features of microparticle deformation upon impact with a solid barrier], *Prikladnaia mekhanika i tekhnicheskaya fizika* [Applied mechanics and technical physics], 41 (1) (2000) 204–209.
- [6] R. Ghelichi, S. Bagherifard, M. Guagliano, M. Verani, Numerical simulation of cold spray coating, *Surface and Coatings Technology*, 205 (23–24) (2011) P. 5294–5301. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2011.05.038
- [7] H. Assadi, F. Gärtner, T. Stoltenhoff, H. Kreye, Bonding mechanism in cold gas spraying, *Acta Materialia*, 51 (15) (2003) 4379–4394. DOI: 10.1016/S1359-6454(03)00274-X

- [8] P.C. King, G. Bae, S.H. Zahiri, M. Jahedi, C. Lee, An experimental and finite element study of cold spray copper impact onto two aluminum substrates, *Journal of Thermal Spray Technology*, 19 (2010) 620–634. DOI: 10.1007/s11666-009-9454-7
- [9] P. King, M. Vucko, A.J. Poole, M. Jahedi, R. de Nys, Cold spray antifouling of marine seismic streamers, <https://publications.csiro.au/rpr/download?pid=csiro:EP124574&dsid=DS1>. Accessed October 28, 2025.
- [10] M.J. Vucko, P.C. King, A.J. Poole, C. Carl, M.Z. Jahedi, R. de Nys, Cold spray metal embedment: an innovative antifouling technology, *Biofouling*, 28 (3) (2012) 239–248. DOI: 10.1080/08927014.2012.670849
- [11] A. Moridi, S.M. Hassani-Gangaraj, M. Guagliano, A hybrid approach to determine critical and erosion velocities in the cold spray process, *Applied Surface Science*, 273 (2013) 617–624. DOI: 10.1016/j.apsusc.2013.02.089
- [12] I.A. Kozlov, K.A. Leshchev, A.A. Nikiforov, S.A. Demin, Cold Spray Coatings (review), *Trudy VIAM (Proceedings of VIAM)*, 90 (8) (2020) 77–93. DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-77-93
- [13] O.V. Belai, S.P. Kiselev, V.P. Kiselev, Numerical simulation of a nanoparticle collision with a target by the molecular dynamics method under the conditions of cold gas-dynamic spraying, *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 64 (6), 27–35. DOI: 10.15372/PMTF202315303
- [14] T. Schmidt, H. Assadi, F. Gärtner, H. Richter, T. Stoltenhoff, H. Kreye, T. Klassen, From particle acceleration to impact and bonding in cold spraying, *Journal of Thermal Spray Technology*, 18 (2009) 794–808. DOI: 10.1007/s11666-009-9357-7
- [15] E.S. Prusov, V.B. Deev, P.K. Shurkin, S.M. Arakelian, The effect of alloying elements on the interaction of boron carbide with aluminum melt, *Non-ferrous Metals*, 1 (2021) 27–33. DOI: 10.17580/nfm.2021.01.04
- [16] A.V. Aborkin, D.M. Babin, A.I. Elkin, V.V. Ryabkova, Microhardness of gas-dynamic coatings from aluminum powder multi-reinforced with fullerenes and aluminum oxide, *Non-ferrous Metals*, 2 (2024) 52–57. DOI: 10.17580/nfm.2024.02.08
- [17] I.A. Kozlov, A.A. Nikiforov, S.A. Dyomin, A.I. Vdovin, Use of metal powder composition of the zinc–aluminum system for application of a protective coating by the method of cold gas-dynamic spraying, *Trudy VIAM (Proceedings of VIAM)*, 7 (113) (2022) 89–98. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-7-89-98

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Sviatoslav A. BLINOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: blinov_sa@spbstu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-2017-8249>

Alexey M. LEVITSKY – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: levitskij_am@spbstu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7900-4007>

Oleg G. ZOTOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: zog-58@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3243-4359>

Nikita A. GOLUBKOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: golubkov-na@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-6785-1444>

Поступила: 22.09.2025; Одобрена: 27.10.2025; Принята: 27.10.2025.

Submitted: 22.09.2025; Approved: 27.10.2025; Accepted: 27.10.2025.