

Металлургия. Материаловедение Metallurgy. Material Science

Научная статья

УДК 620.193

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.32104>



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 НИКЕЛЕВОГО И ЦИНКОВОГО ПОРОШКОВЫХ ПОКРЫТИЙ, НАНЕСЕННЫХ МЕТОДОМ ХОЛОДНОГО ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ

Аннотация. В работе проведены сравнительные испытания покрытий, нанесенных методом холодного газодинамического напыления (ХГДН), на пластины из стали СтЗсп. Напыление производилось на установке «Димет-405». Для напыления использовались готовые смеси: никелевая N3-00-02 и цинковая Z-00-11. После нанесения были проведены механические и коррозионные испытания полученных образцов. В результате визуального контроля, металлографического исследования, анализа скоростей коррозии и механических испытаний было показано, что покрытие на основе цинка превосходит покрытие на основе никеля по коррозионным свойствам, тогда как покрытие на основе никеля показало большую устойчивость к растрескиванию при изгибе.

Ключевые слова: коррозия, никель, цинк, ХГДН, коррозионностойкое покрытие.

Для цитирования:

Блинов С.А., Левитский А.М., Зотов О.Г., Голубков Н.А. Сравнительные испытания коррозионной стойкости никелевого и цинкового порошковых покрытий, нанесенных методом холодного газодинамического напыления // Глобальная энергия. 2026. Т. 32, № 1. С. 53–65. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.32104>



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 NICKEL AND ZINC POWDER COATINGS APPLIED BY COLD GAS DYNAMIC SPRAYING

Abstract. The study conducted comparative tests of coatings deposited on St3sp steel plates using Cold Gas Dynamic Spraying (CGDS) method. The experiments were carried out using a “Dimet – 405” system. Ready-made powder mixtures were chosen as the material for spraying: nickel N3-00-02 and zinc Z-00-11. After deposition, the samples were subjected to mechanical and corrosion tests. As a result of visual inspection, metallographic examination, analysis of corrosion rates and mechanical tests, zinc-based coatings demonstrated superior to nickel-based coatings corrosion properties, while nickel-based coatings have shown higher resistance to cracking during bending.

Keywords: corrosion, nickel, zinc, 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 nickel and zinc powder coatings applied by cold gas dynamic spraying, *Global Energy*, 32 (01) (2026) 53–65, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.32104>

Введение. Повышение срока эксплуатации изделий за счет нанесения покрытий является распространенной практикой в современной промышленности. Существует ряд задач, в которых критически важно не допустить перегрева изделия в процессе нанесения покрытия. Одним из методов, соответствующих данному требованию, является холодное газодинамическое напыление (ХГДН).

Этот способ нанесения покрытий относится к газотермическим [1]. Его суть заключается в придании частичкам металла кинетической энергии при помощи сжатого подогретого воздуха. В момент соприкосновения с подложкой частицы деформируются и налипают на нее, тем самым образуя сплошное покрытие [2–9]. Метод позволяет наносить широкий спектр материалов, начиная с полимерных [10] и заканчивая чистыми металлами или сплавами [11].

Материалы и методы

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

Напыление производилось на установке ХГДН с низким давлением воздуха «Димет-405» (рис. 1). Напыление при низком давлении допустимо для металлов с высокой пластичностью [12]. Сравнение было проведено для никелевого и цинкового покрытий, в качестве материала для напыления были взяты готовые смеси: никелевая N3-00-02 и цинковая Z-00-11. В смесях, помимо основного металла, для повышения адгезионных свойств, содержался корунд Al_2O_3 [13–15]. Помимо оксида алюминия возможно добавление других керамических частиц, например SiC или BC [16].

Для использованных смесей исследовали технологические характеристики. Определение гранулометрического состава проводили на лазерном анализаторе размера частиц Fritsch



Рис. 1. Установка «Димет-405»

Fig. 1. "Dimet-405" unit

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

Analysette 22 NanoTec plus. Морфологию частиц определили на сканирующем электронном микроскопе Carl Zeiss Supra 40VP, используя детектор вторичных электронов.

Нанесение покрытий выполняли вручную, чтобы максимально приблизить условия к реальному использованию установки. Перед нанесением образцы обезжиривали и затем подвергали абразивной обработке порошком электрокорунда К-00-04-02 на установке «Димет-405». Такая подготовка создает необходимую шероховатость поверхности для улучшения адгезии покрытия. Покрытия наносились при температуре 440°C. Полученные образцы представлены на рис. 2.

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 проводились 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 стали до и после коррозионных испытаний проводили на оптическом микроскопе Leica DMI 5000. На шлифах проводилось измерение толщины

покрытия. Также был определен химический состав окислов, образовавшихся в результате испытаний. Исследование проводили на сканирующем электронном микроскопе Carl Zeiss Supra 40VP с использованием энерго-дисперсионного детектора Oxford методом рентгеноспектрального микроанализа.

Анализ результатов

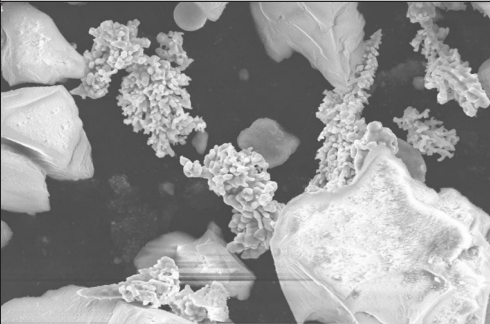
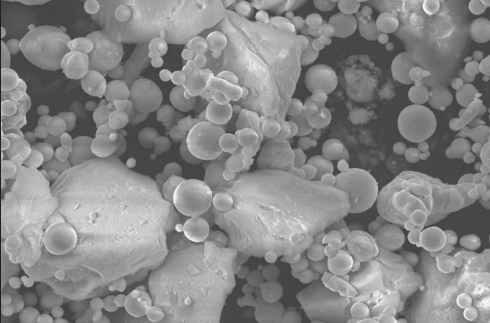
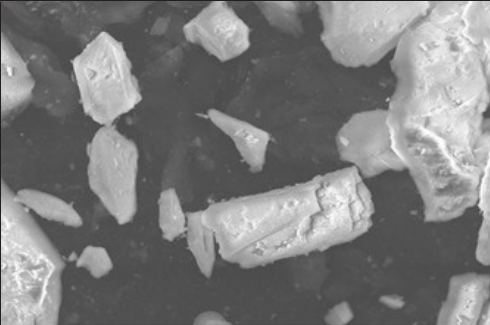
Результаты исследований морфологии и гранулометрического состава приведены в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Морфология частиц (увеличение x1,5K)

Table 2

Morphology of particles (1.5K magnification)

Название порошка	Фото частиц	Форма частиц
N3-00-02		Дендритная (частицы никеля) / осколочная (частицы корунда)
Z-00-11		Сферическая (частицы цинка) / осколочная (частицы корунда)
K-00-04-02		Осколочная (частицы корунда)

Основная часть частиц во всех исследованных порошках составляет 40–60 мкм, при этом форма частиц варьируется. Следовательно, при подготовке порошковых смесей для нанесения покрытий методом ХГДН следует уделять внимание прежде всего фракции, тогда как форма частиц не оказывает существенного влияния.

В табл. 4 приведены результаты испытаний на трехточечный изгиб.

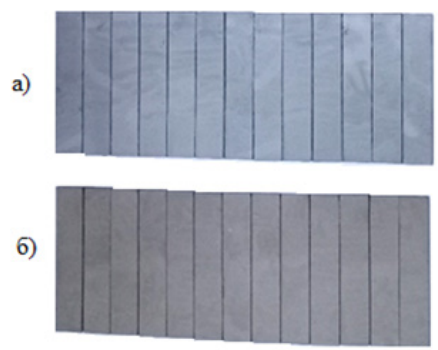


Рис. 2. Общий вид образцов после нанесения:
а) образцы из Ст3 + ХГДН Z-00-11; б) образцы из Ст3 + ХГДН N3-00-02

Fig. 2. General view of the samples after deposition:
a) steel samples + CGDS Z-00-11; b) steel samples + CGDS N3-00-02

Таблица 3

Гранулометрический состав порошков

Table 3

Granulometric composition of powders

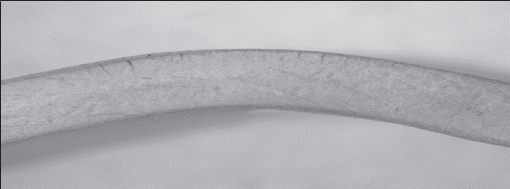
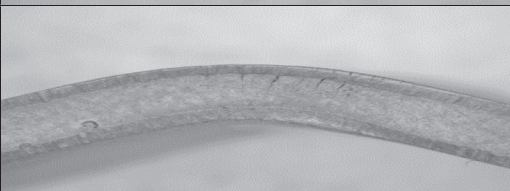
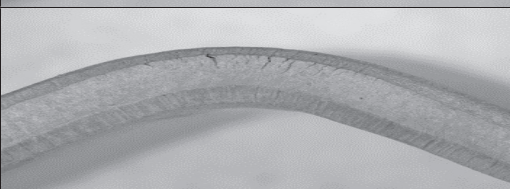
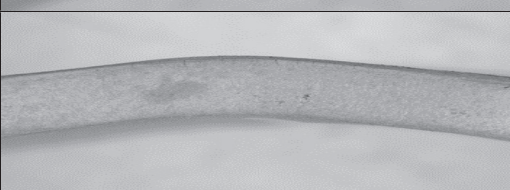
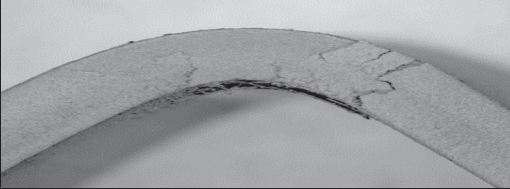
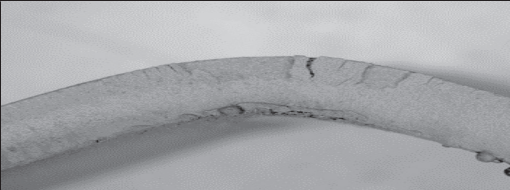
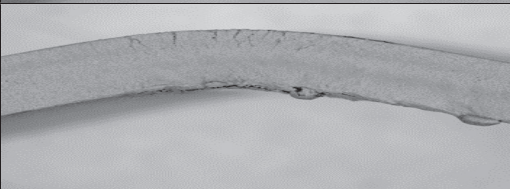
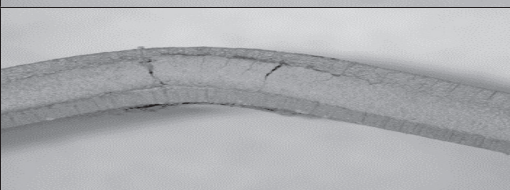
Марка порошка	Гранулометрический состав
Z-00-11	
N3-00-02	
K-00-04-02	

Таблица 4

Вид образцов после проведения механических испытаний

Таблица 4

Samples after mechanical testing

Материал покрытия	Вид трещин на покрытии	Угол загиба, °	Толщина покрытия, мкм
Z-00-11		44	122
		51	132
		72	82,5
		26	87
N3-00-02		98	39
		61	49,5
		39	52,5
		45	47

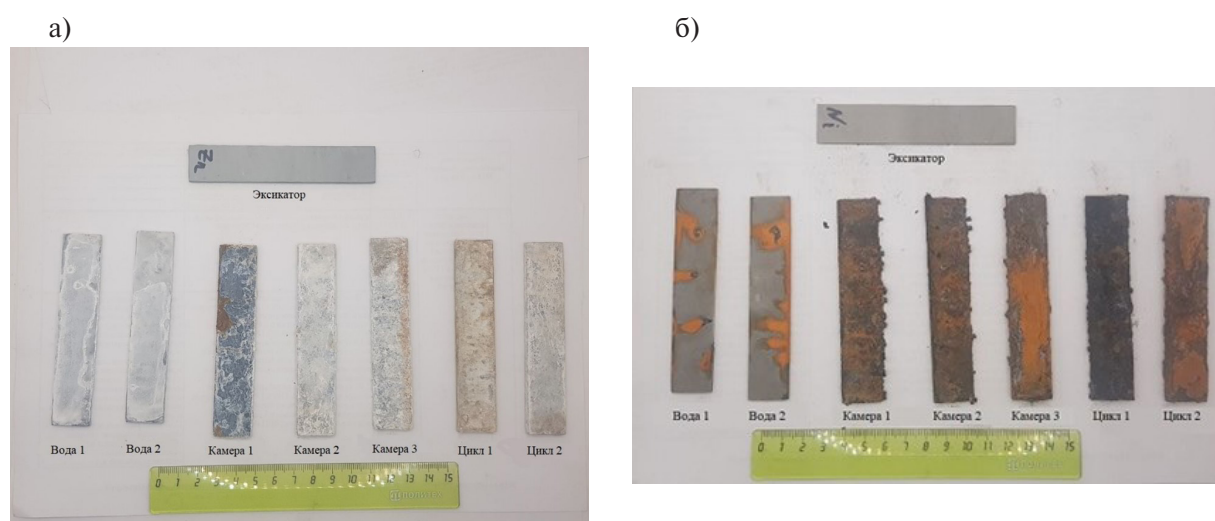


Рис. 3. Общий вид образцов после коррозионных испытаний:
а) образцы Ст3 + ХГДН Z-00-11; б) образцы Ст3 + ХГДН N3-00-02

Fig. 3. General view of the samples after corrosion testing:
a) steel samples + CGDS Z-00-11; b) steel samples + CGDS N3-00-02

Механические испытания показали, что покрытия на основе никеля обладают большей устойчивостью к трещинообразованию при изгибе. Средний угол изгиба, при котором образовалась трещина, для никелевого покрытия составил $60,8^\circ$, а для цинкового покрытия — $48,3^\circ$.

На рис. 3 показан внешний вид образцов после коррозионных испытаний в сравнении с видом образцов, хранившихся в эксикаторе. Скорости коррозии показаны в табл. 5.

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	Ni	0,0558	0,3243	0,0265
2		0,1070	0,6483	0,0076
3		0,2922	—	—
4	Zn	0,0617	0,0464	0,0178
5		0,0832	0,0843	0,0044
6		0,0693	—	—

Результаты эксперимента показывают, что скорость коррозии у образцов с цинковым покрытием в среднем значительно ниже, чем у образцов с никелевым покрытием. Кроме того, на образцах с никелевым покрытием заметно большое количество окислов железа. На некоторых образцах с цинковым покрытием также заметны небольшие очаги коррозии.

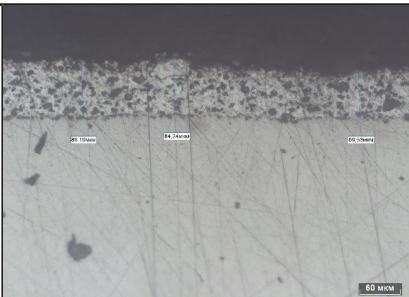
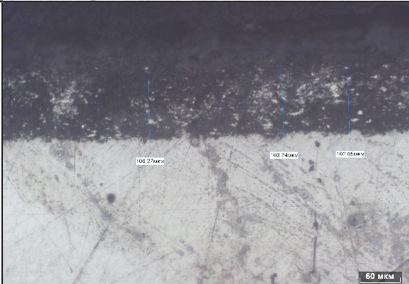
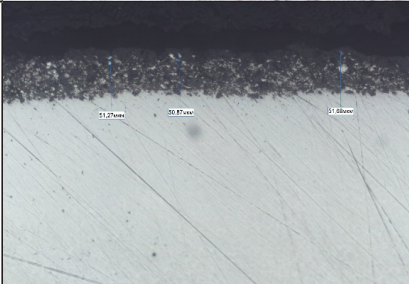
В табл. 6 показаны фотографии структуры покрытий образцов из эксикатора, а также образцов после коррозионных испытаний.

Таблица 6

Образцы с цинковым покрытием

Table 6

Zinc-coated samples

Исходный образец		Средняя толщина слоя составила 79,96 мкм. Покрытие нанесено равномерно
Испытания при воздействии нейтрального соляного тумана		Средняя толщина слоя составила 98,05 мкм. Следов коррозии металла подложки нет. Заметно небольшое истончение покрытия, что является следствием взаимодействия цинка с коррозионной средой.
Циклические испытания «нейтральный соляной туман — воздух»		Средняя толщина слоя составила 103,85 мкм. Следов коррозии стальной подложки нет. Заметно небольшое истончение покрытия, что свидетельствует о взаимодействии цинка с коррозионной средой.
Испытание в морской воде		Средняя толщина слоя составила 51,27 мкм. Следов коррозии основного материала нет. Наблюдается сильное истончение покрытия.

Обсуждение

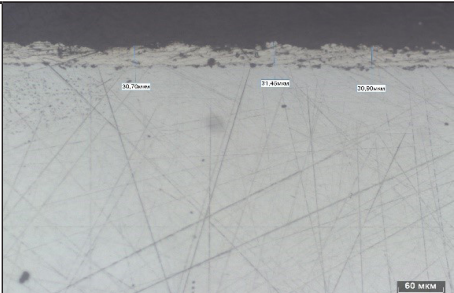
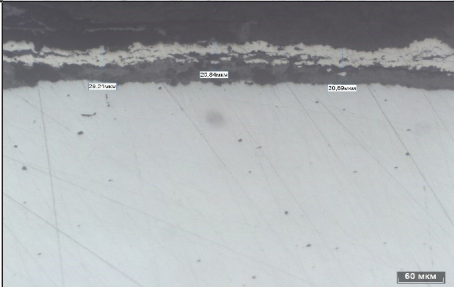
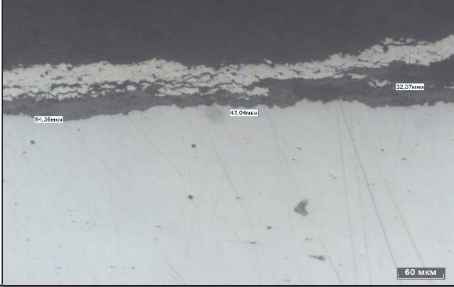
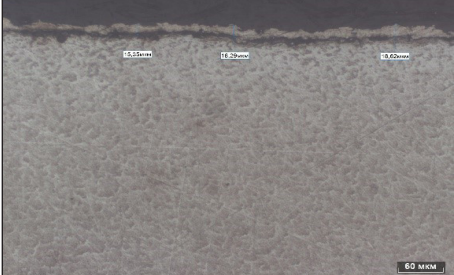
Предметом обсуждения является низкая коррозионная стойкость напыленного никелевого покрытия. Выдвинуто предположение, что толщина никелевого покрытия, в среднем составившая 29,5 мкм, оказалась недостаточной для защиты основного металла. В свою очередь малая толщина покрытия может получаться в связи с некорректным выбором температуры напыления. Нельзя также исключать возможность образования сквозных дефектов в никелевом покрытии при температуре нанесения 440°C. Этот вопрос требует дополнительного изучения.

Таблица 7

Образцы с никелевым покрытием

Table 7

Nickel-coated samples

Исходный образец		Средняя толщина слоя покрытия составила 31,02 мкм. Покрытие нанесено неравномерно.
Испытания при воздействии нейтрального соляного тумана		Средняя толщина слоя покрытия 26,91 мкм. В слое защитного покрытия наблюдаются сквозные дефекты. Также отчетливо виден слой оксидов под покрытием.
Циклические испытания «нейтральный соляной туман — воздух»		Средняя толщина слоя покрытия составила 43,26 мкм. Наблюдается отслоение антикоррозийного покрытия. Образование оксидов под покрытием могло привести к его частичному отслоению.
Испытание в морской воде		Средняя толщина слоя покрытия составила 16,75 мкм. Наблюдается слой оксидов под покрытием.

Заключение

По результатам всех коррозионных испытаний на стальных пластинах, покрытых никелем, очаги коррозии появились менее чем через 72 часа с начала испытаний. На стальных пластинах, покрытых цинком, очагов коррозии обнаружено не было.

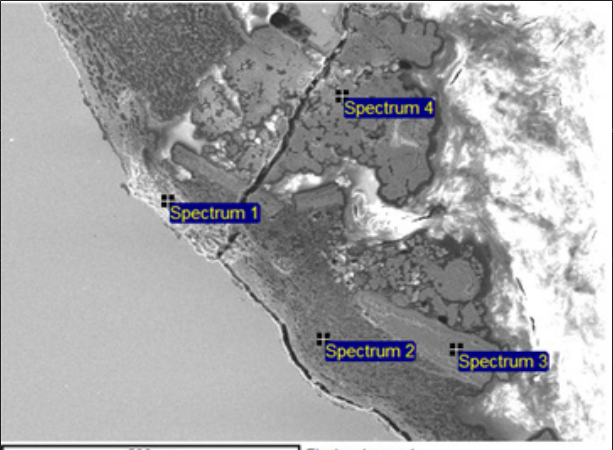
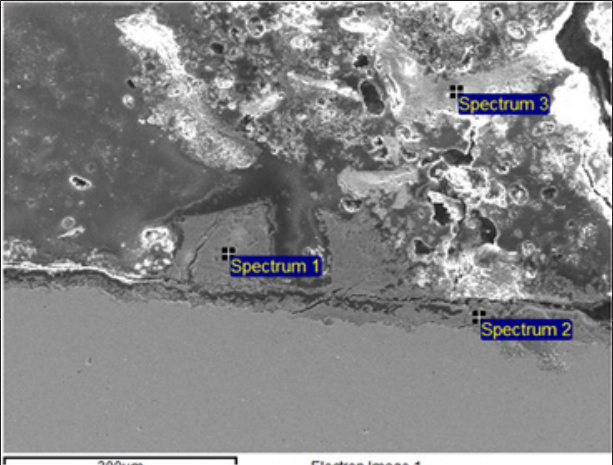
Исследования на сканирующем электронном микроскопе показали, что на образце с цинковым покрытием практически отсутствуют окислы железа, что говорит о высокой эффективности подобного покрытия. В то же время на образце с покрытием из никеля наблюдаются преимущественно оксиды железа, что указывает на его низкую коррозионную стойкость.

Таблица 8

Результаты исследования на сканирующем электронном микроскопе

Table 8

Results of the scanning electron microscope examination

Материал покрытия	Фотография	Химический состав
N3-00-02		Spectrum 1 O – 34,64% Cl – 1,56% Fe – 63,80%
		Spectrum 2 O – 24,80% Cl – 1,74% Fe – 73,46%
		Spectrum 3 O – 41,99% Fe – 58,01%
		Spectrum 4 O – 43,14% Fe – 56,86%
Z-00-11		Spectrum 1 O – 37,87% Cl – 4,64% Fe – 3,89% Zn – 53,59%
		Spectrum 2 O – 37,53% Cl – 3,92% Fe – 44,62% Zn – 13,92%
		Spectrum 3 O – 45,14% Cl – 5,92% Fe – 2,93% Zn – 46,01%

Причиной являются следующие факторы:

1) цинк является протектором, то есть его электрохимический потенциал ниже, чем у железа, соответственно, во время электрохимической коррозии цинк будет растворяться, тем самым защищая сталь;

2) металлографическое исследование показало, что при ручном нанесении никелевое покрытие ложится на стальную пластину неравномерно и покрытие получается слишком тонким. Чего нельзя сказать о цинковом покрытии, которое получилось сплошным и равномерным.

Покрытие на основе никеля продемонстрировало большую устойчивость к растрескиванию при изгибе. В случае покрытия на основе никеля средний угол изгиба, при котором наблюдается растрескивание, составил 60,7°. Для покрытия на основе цинка этот показатель составил 48,2°.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Алхимов А.П., Клинков С.В., Косарев В.Ф. Экспериментальное исследование деформации и соединения микрочастиц с преградой при высокоскоростном ударе // Прикладная механика и техническая физика. 2000. Т. 41, № 2. С. 47–52.
- [2] Li W.Y., Zhang D.D., Huang C.J., Yin S., Yu M., Wang F.F., Liao H.L. Modelling of impact behaviour of cold spray particles: review, *Surface Engineering*, 30 (2014) 299–308. DOI: 10.1179/1743294414Y.00000000268
- [3] Rahmati S., Ghaei A. The use of particle/substrate material models in simulation of cold-gas dynamic-spray process, *Journal of Thermal Spray Technology*, 23 (2014) 530–540. DOI: 10.1007/s11666-013-0051-4
- [4] 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
- [5] 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
- [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] Алхимов А.П., Клинков С.В., Косарев В.Ф., Фомин В.М. Холодное газодинамическое напыление. Теория и практика. М.: Физматлит, 2010. 536 с.
- [8] 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.
- [9] 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
- [10] Гнеденков А.С., Номеровский А.Д., Цветников А.К., Синебрюхов С.Л., Гнеденков С.В. Формирование композиционных полимерсодержащих покрытий на стали Ст3 с применением технологии холодного газодинамического напыления // Вестник ДВО РАН. 2022. № 6. С. 35–45. DOI: 10.37102/0869-7698_2022_226_06_3
- [11] Яковлева Н.В., Фармаковский Б.В., Макаров А.М., Старицын М.В. Исследование влияния отжига на свойства и структуру каталитического носителя на основе системы Ni-Al-Al₂O₃ на металлической подложке, полученного методом холодного газодинамического напыления // Наукоемкие технологии в машиностроении. 2022. Т. 5, № 131. С. 39–48. DOI: 10.30987/2223-4608-2022-5-39-48
- [12] 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
- [13] 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
- [14] 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
- [15] Павлов И.С. Определение влияния технологических параметров режимов напыления на структуру и свойства функциональных покрытий на основе Al₂O₃ и Cu, полученных методом холодного газодинамического напыления низкого давления // Международный научно-исследовательский журнал. 2023. Т. 130, № 4. С. 1–15. DOI: 10.23670/IRJ.2023.130.20

[16] **Косарев В.Ф., Шикалов В.С., Фуад М.Г., Видюк Т.М., Клинков 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

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] **A.P. Alkhimov, S.V. Klinkov, V.F. Kosarev**, Eksperimental'noe issledovanie deformatsii i soedineniia mikrochastits s pregradoi pri vysokoskorostnom udare [Experimental study of deformation and connection of microparticles with a barrier during high-speed impact], Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 41 (2) (2000) 47–52.
- [2] **W.Y. Li, D.D. Zhang, C.J. Huang, S. Yin, M. Yu, F.F. Wang, H.L. Liao**, Modelling of impact behaviour of cold spray particles: review, Surface Engineering, 30 (2014) 299–308. DOI: 10.1179/1743294414Y.0000000268
- [3] **S. Rahmati, A. Ghaei**, The use of particle/substrate material models in simulation of cold-gas dynamic-spray process, Journal of Thermal Spray Technology, 23 (2014) 530–540. DOI: 10.1007/s11666-013-0051-4
- [4] **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
- [5] **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
- [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] **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.

- [8] A.P. Alkhimov, A.I. Gulidov, V.F. Kosarev, N.I. Nesterovich, Osobennosti deformirovaniia mikrochas-tits pri udare o tverduui pregradu [Features of microparticle deformation upon impact with a solid barrier], Prikladnaia mekhanika i tekhnicheskaiia fizika [Applied mechanics and technical physics], 41 (1) (2000) 204–209.
- [9] 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
- [10] A.S. Gnedenkov, A.D. Nomerovskii, A.K. Tsvetnikov, S.L. Sinebryukhov, S.V. Gnedenkov, Formation of the composite polymercontaining coatings on St3 steel using cold gas dynamic spraying technology, Vestnik of the FEB RAS, 6 (2022) 35–45. DOI: 10.37102/0869-7698_2022_226_06_3
- [11] N.V. Yakovleva, B.V. Farmakovskiy, A.M. Makarov, M.V. Staritsyn, Study of negative hardening effect on the properties and structure of the catalytic carrier based on a Ni-Al-Al₂O₃ system on a metal substrate obtained by cold gas dynamic coating, Science intensive technologies in Mechanical Engineering, 5 (131) (2022) 32–48. DOI: 10.30987/2223-4608-2022-5-39-48
- [12] 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
- [13] T. Prusov, V.B. Deev, P.K. Shurkin, S.M. Arakelian, The effect of alloying elements on the in-teraction of boron carbide with aluminum melt, Non-ferrous Metals, 1 (2021) 27–33. DOI: 10.17580/nfm.2021.01.04
- [14] 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
- [15] I.S. Pavlov, The determination of the influence of technological parameters of spraying regimes on the structure and properties of functional Al₂O₃ and Cu based coatings obtained by low pressure gas dynamic cold spraying, International Research Journal, 130 (4) (2023) 1–15. DOI: 10.23670/IRJ.2023.130.20
- [16] V.F. Kosarev, V.S. Shikalov, M.G. Fouad, T.M. Vidyuk, S.V. Klinkov, Structure and properties of composite coatings cold sprayed from powder mixtures of Aluminum and Boron carbide, Siberian Journal of Physics, 17 (3) (2022) 47–52. DOI: 10.25205/2541-9447-2022-17-3-47-52

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.