

Научная статья
УДК 620.193+544.653
DOI: 10.37102/0869-7698_2022_226_06_3

Формирование композиционных полимерсодержащих покрытий на стали Ст3 с применением технологии холодного газодинамического напыления

А.С. Гнеденков, А.Д. Номеровский✉, А.К. Цветников, С.Л. Синебрюхов, С.В. Гнеденков

Гнеденков Андрей Сергеевич
профессор РАН, доктор химических наук
ведущий научный сотрудник
Институт химии ДВО РАН, Владивосток, Россия
asg17@mail.com
<http://orcid.org/0000-0002-9822-7849>

Номеровский Алексей Дмитриевич
младший научный сотрудник
Институт химии ДВО РАН, Владивосток, Россия
nomerovskii.ad@outlook.com
<http://orcid.org/0000-0002-3118-5971>

Цветников Александр Константинович
кандидат химических наук
старший научный сотрудник
Институт химии ДВО РАН, Владивосток, Россия
tsvetnikov@ich.dvo.ru
<http://orcid.org/0000-0001-5296-8003>

Синебрюхов Сергей Леонидович
член-корреспондент РАН, доктор химических наук
заместитель директора
Институт химии ДВО РАН, Владивосток, Россия
sls@ich.dvo.ru
<http://orcid.org/0000-0002-0963-0557>

Гнеденков Сергей Васильевич
член-корреспондент РАН, доктор химических наук
директор
Институт химии ДВО РАН, Владивосток, Россия
svg21@hotmail.com
<http://orcid.org/0000-0003-1576-8680>

Аннотация. Представлены результаты сравнительного исследования свойств композиционных покрытий, формируемых с использованием метода холодного газодинамического напыления на углеродистой конструкционной стали Ст3. Установлено, что введение ультрадисперсного политетрафторэтилена в состав композиционного покрытия увеличивает коррозионную стойкость базового медно-цинкового покрытия. Анализ электрохимических характеристик показал высокие защитные свойства покрытия с напыленным базовым медно-цинковым слоем, содержащим УПТФЭ, нанесенный фрикционным методом. Лучшими антикоррозионными свойствами обладает покрытие, полученное с большим количеством этапов обработки, а именно с напыленным базовым покрытием, подвергнутое температурной обработке в течение 1 ч при 500 °С до и при 350 °С после нанесения фрикционным методом УПТФЭ. Плотность тока коррозии I_c таких покрытий в 25 раз ниже значения данного параметра для базового медно-цинкового покрытия.

Ключевые слова: холодное газодинамическое напыление, защитные покрытия, фторполимеры, сталь, электрохимия

Для цитирования: 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 // Вестн. ДВО РАН. 2022. № 6. С. 35–45. http://dx.doi.org/10.37102/0869-7698_2022_226_06_3.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 21-73-10148). Анализ морфологии образцов проведен в рамках государственного задания Института химии ДВО РАН (проект № FWFN(0205)-2022-0003).

Original article

Formation of the composite polymercontaining coatings on St3 steel using cold gas-dynamic spraying technology

A.S. Gnedenkov, A.D. Nomerovskii, A.K. Tsvetnikov, S.L. Sinebryukhov, S.V. Gnedenkov

Andrey S. Gnedenkov

Professor of RAS, Doctor of Sciences in Chemistry
Leading Researcher
Institute of Chemistry, FEB RAS, Vladivostok, Russia
asg17@mail.com
<http://orcid.org/0000-0002-9822-7849>

Aleksei D. Nomerovskii

Junior Researcher
Institute of Chemistry, FEB RAS, Vladivostok, Russia
nomerovskii.ad@outlook.com
<http://orcid.org/0000-0002-3118-5971>

Alexander K. Tsvetnikov

Candidate of Sciences in Chemistry
Senior Researcher
Institute of Chemistry, FEB RAS, Vladivostok, Russia

tsvetnikov@ich.dvo.ru
<http://orcid.org/0000-0001-5296-8003>

Sergey L. Sinebryukhov

Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Sciences in Chemistry
Deputy Director

Institute of Chemistry, FEB RAS, Vladivostok, Russia

sls@ich.dvo.ru

<http://orcid.org/0000-0002-0963-0557>

Sergey V. Gnedenkov

Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Sciences in Chemistry
Director

Institute of Chemistry, FEB RAS, Vladivostok, Russia

svg21@hotmail.com

<http://orcid.org/0000-0003-1576-8680>

Abstract. The paper presents the results of studying the properties of composite coatings formed by the cold spraying technique on St3 carbon construction steel. As a result of the research, it was found that the introduction of super dispersed polytetrafluoroethylene into the composition of the coating increases the corrosion resistance of the basic copper-zinc coating. Analysis of the electrochemical tests results shows that the sample with the coating formed by spraying the copper-zinc particles and subsequent treatment with friction-applied SPTFE has a high corrosion protection. The best anticorrosion properties were revealed for the coating obtained with more processing steps, namely, with a sprayed base coating annealed at 500 °C for 1 h, with SPTFE applied by friction method and re-annealed at 350 °C for 1 hour. Corrosion current density I_c of such coatings is 25 times lower than the value of this parameter for the base copper-zinc coating.

Keywords: cold gas dynamic spraying, protective coatings, fluoropolymers, steel, electrochemistry

For citation: Gnedenkov A.S., Nomerovskii A.D., Tsvetnikov A.K., Sinebryukhov S.L., Gnedenkov S.V. Formation of the composite polymercontaining coatings on St3 steel using cold gas-dynamic spraying technology. *Vestnik of the FEB RAS*. 2022;(6):35-45. (In Russ.). http://dx.doi.org/10.37102/0869-7698_2022_226_06_3.

Funding. This work was supported by the Russian Science Foundation (project No. 21-73-10148). The analysis of the morphology of the samples was carried out within the framework of the state task of the Institute of Chemistry, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (project no. FWFN(0205)-2022-0003).

Введение

Стальные конструкции активно используются во всех сферах: железнодорожное сообщение, железобетонные изделия (мосты, различные сооружения, линии электропередач, аэродромные плиты и т.д.), трубы водо- и теплоснабжения. Стальные изделия часто эксплуатируются в агрессивных условиях (кислые газы, аэрозоли растворов неорганических солей, частиц грязи, перепады температур, УФ-излучение, статические и динамические нагрузки) [1]. Поэтому проблема коррозионного разрушения стальных конструкций весьма актуальна. Из-за коррозии промышленность несет существенные потери. Процесс коррозии влияет на прочность материала, а продукты коррозии могут служить причиной выхода из

стройка электрооборудования, водопроводных, тепловых систем. Помимо этого существуют косвенные потери, связанные с негативным влиянием на окружающую среду и угрозой безопасности [2].

Существуют разные способы защиты стали от коррозии: легирование металла элементами, обладающими большей стойкостью к участию в окислительно-восстановительных реакциях (хром, ванадий, никель, марганец и другие); нанесение защитного покрытия; изменение химического состава окружающей среды. Наиболее рациональным, эффективным и недорогим способом защиты является нанесение защитного покрытия [3–9]. Возможно нанесение лакокрасочного материала [4, 10] (в том числе с добавками наночастиц [3] и ингибиторов [4]), цинкового покрытия [11]. Также существует метод плазменного электролитического оксидирования, позволяющий создавать плотные гетерооксидные покрытия на вентильных металлах (например, Al, Mg, Ti) [12–16]. К сожалению, данный метод мало применим для стали. В связи с этим был предложен иной метод нанесения защитного покрытия на сталь – холодное газодинамическое напыление (ХГН) [17, 18].

Холодное газодинамическое напыление используется для нанесения на металлическую поверхность толстых покрытий из различных веществ, в основном металлов или керамики [19]. Это твердотельный метод обработки, при котором частицы микронного размера ускоряются (до сверхзвуковых скоростей) по направлению к подложке при относительно низких температурах (до 600 К) [20]. При разгоне до сверхзвуковых скоростей частицы приобретают высокую кинетическую энергию, и при столкновении с обрабатываемой поверхностью происходит деформация как частиц, так и подложки с образованием прочной химической и механической связи напыляемых частиц друг с другом и подложкой [17]. В этом методе плавление порошка встречается крайне редко. В отличие от высокотемпературного напыления и лучевых (лазерных или электронных) методов нанесения, при ХГН частицы исходного сырья остаются в твердом состоянии (по крайней мере для подавляющего большинства металлических материалов) на протяжении всего процесса [21]. Благодаря использованию низких температур покрытие, нанесенное методом ХГН, обладает уникальными свойствами [5, 19, 22]. Микроструктура и свойства исходных порошков сохраняются, что позволяет избежать процесса окисления или любых других неблагоприятных структурных изменений, а это повышает долговечность и эффективность покрытий. Сцепление подложки с покрытием и целостность защитного слоя связаны с пластической деформацией частиц при ударе. Адгезия покрытия к подложке может происходить в твердом состоянии напыляемых компонент без существенного повреждения подложки даже для термочувствительных материалов. Хотя изначально ХГН использовалось для осаждения металлов, в настоящее время оно применяется также для осаждения полимеров или керамики [5].

В данной статье проведен сравнительный анализ полученных медно-цинковых и фторполимерных покрытий, сформированных методом холодного газодинамического напыления, на конструкционной стали Ст3. Изучены морфологические и электрохимические характеристики покрытий. Также проведено сравнение влияния способа нанесения (фрикционный метод или метод холодного газодинамического напыления) ультрадисперсного политетрафторэтилена (УПТФЭ) на свойства получаемых защитных покрытий.

Материалы и методики

Для исследования морфологических и электрохимических характеристик покрытий были подготовлены образцы конструкционной стали Ст3 размерами 50×50×3 мм. Для обеспечения однородности поверхности образцы были механически обработаны на шлифовальном станке шлифовальной бумагой на основе карбида кремния (SiC) с размером зерна абразива 100–250 мкм (P120). Корундовый порошок марки К-00-04-02 (ДИМЕТ®) (размер частиц порошка 200–250 мкм) использовался для очистки и струйно-абразивной подготовки поверхности стали перед нанесением металлического покрытия. Порошок марки С-01-11 (производитель ДИМЕТ®) был использован для нанесения медно-цинкового покрытия, обладающего развитой поверхностью, улучшающей адгезию наносимого УПТФЭ (торговая марка ФОРУМ®). Размер частиц порошка 5–50 мкм, состав порошка (в масс.%): медь – 38,3, цинк – 28,6, корунд – 33,1.

Порядок получения покрытий представлен на рис. 1, где S – образец стали Ст3 без покрытия; SC – образец стали Ст3 с напыленным базовым медно-цинковым покрытием; SC-FF – образец SC с УПТФЭ, нанесенным фрикционным методом; SC-FCS – образец SC с УПТФЭ, нанесенным методом холодного газодинамического напыления; SC-500 – образец SC, отожженный при 500 °С в течение 1 ч; SC-500-FF – образец SC-500 с УПТФЭ, нанесенным фрикционным методом; SC-500-FF-350 – образец SC-500-FF, отожженный повторно, при 350 °С в течение 1 ч.

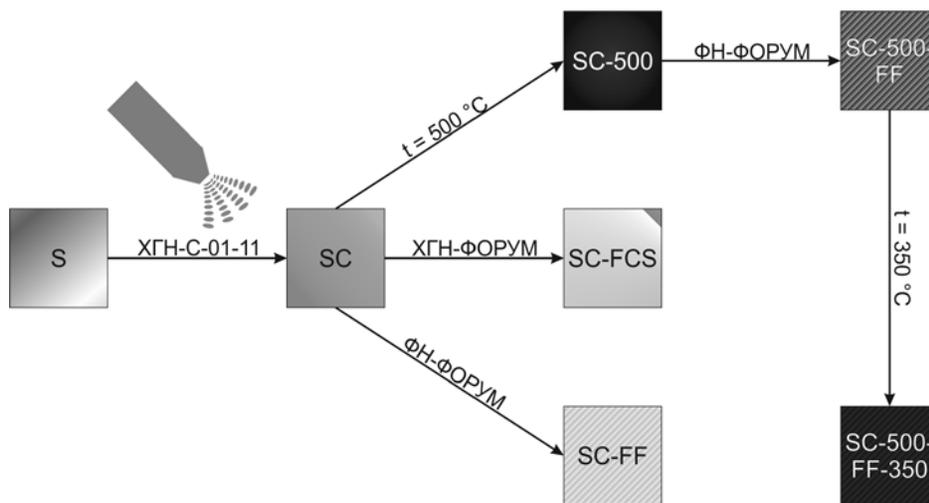


Рис. 1. Схема подготовки образцов (ХН – холодное газодинамическое напыление; ФН – фрикционное нанесение; С-01-11 – порошок меди и цинка (ДИМЕТ®); УПТФЭ – ультрадисперсный политетрафторэтилен. Остальные условные обозначения в тексте

Покрытия наносили методом ХГН при помощи оборудования ДИМЕТ® (рис. 2), круглого сверхзвукового сопла диаметром 5 мм, с использованием сжатого воздуха под давлением 5 атм. без предварительного нагревания. Расстояние от сопла до поверхности субстрата составляло ~4 см, сопло перемещалось относительно подложки со скоростью ~1 см/с. Для нанесения УПТФЭ фрикционным методом использовалась пластиковая щетка с ПВХ-щетинами диаметром ~200 мкм. Термическая обработка образцов проводилась в муфельной печи L 9/13/B180 (Nabertherm, Германия).

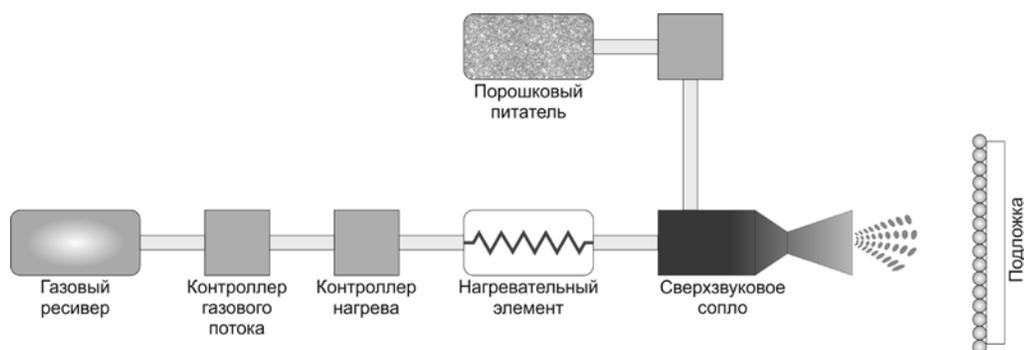


Рис. 2. Схема установки холодного газодинамического напыления ДИМЕТ®

Контроль толщины формируемых покрытий проводили с помощью микрометра модели 908.750 (Schut Geometrical Metrology, Германия); контроль массы наносимых покрытий – с помощью аналитических весов AUW120D (Shimadzu, Япония).

Морфология поверхности образцов была изучена с использованием сканирующего электронного микроскопа EVO 40 (Carl Zeiss, Германия), оснащенного модулем INCA X-act (Oxford Instruments, Великобритания) для проведения элементного анализа методом энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС).

Электрохимические исследования методами потенциодинамической поляризации и электрохимической импедансной спектроскопии с использованием электрохимической системы Modulab XM MTS (Solartron Analytical, США) выполняли при комнатной температуре в трехэлектродной ячейке в 3,5%-м растворе NaCl. Площадь исследуемой поверхности составила 1 см². Противоеlectродом служила платинированная ниобиевая сетка, электродом сравнения – хлоридсеребряный (Ag/AgCl) электрод (потенциал относительно нормального водородного электрода 0,197 В). Перед проведением электрохимических измерений для стабилизации электродного потенциала образцы выдерживали в электролите 15 мин. Значение частоты при электрохимической импедансной спектроскопии изменялось в диапазоне от 100 кГц до 10 мГц с логарифмической разверткой 10 точек на декаду. Потенциодинамические измерения проводили при скорости развертки 1 мВ/с. Поляризация образца осуществлялась в анодном направлении в диапазоне потенциалов от $E_c - 0,2$ В до $E_c + 0,7$ В. Потенциал коррозии, E_c и плотность тока коррозии, I_c , определяли по пересечению экстраполированных анодного и катодного тафелевских участков поляризационной кривой. Потенциодинамическую поляризацию проводили после снятия импедансного спектра для оценки способности покрытий к сохранению защитных свойств.

Результаты

Нанесением медно-цинкового порошка методом холодного газодинамического напыления на стальную подложку было сформировано покрытие с шероховатой поверхностью (рис. 3, SC). ЭДС-анализ (рис. 4) показал равномерное распределение меди и цинка (как основных компонентов напыляемого материала) в структуре покрытия. Определены включения оксида алюминия (данный компонент присутствует в порошке С-01-11). Толщина покрытия составила около 30–40 мкм.

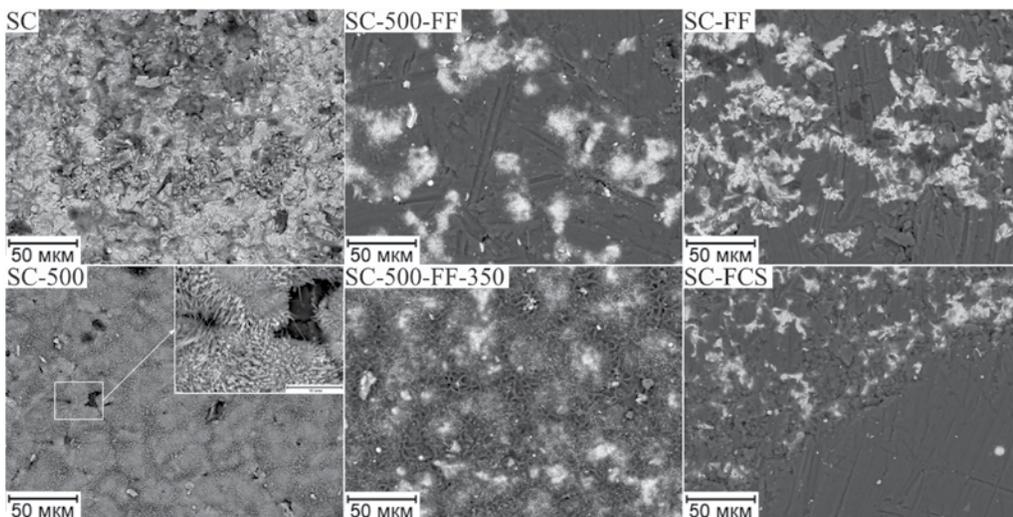


Рис. 3. СЭМ-изображения поверхности образцов стали Ст3 с различными типами сформированных покрытий

После термической обработки при 500 °С в течение 1 ч на покрытия (SC-500) формируется оксидная микроструктура в виде игольчатых кристаллитов. Формирование подобной структуры значительно увеличивает шероховатость поверхности по сравнению с базовым ХГН-покрытием. Данная морфологическая особенность указывает на возможность дальнейшей функционализации покрытия. СЭМ-изображения поверхности образцов SC-FF и SC-500-FF, полученных после фрикционной обработки УПТФЭ образцов SC и SC-500 соответственно, представлены на рис. 3. Темные участки соответствуют областям, содержащим УПТФЭ, светлые – базовому медно-цинковому ХГН-покрытию. Анализ результатов указывает на более высокую сплошность УПТФЭ-слоя на поверхности образца SC-500-FF в сравнении с SC-FF, что является следствием положительного влияния предварительной температурной обработки ХГН-покрытия на последующую модификацию поверхности полимером.

Дальнейшая термическая обработка образца SC-500-FF при 350 °С приводит к удалению легколетучей фракции УПТФЭ, что может вызвать изменение защитных свойств сформированного слоя.

Покрытие, полученное нанесением УПТФЭ методом холодного газодинамического напыления на базовое покрытие (рис. 3, SC-FCS), отличается более высокой

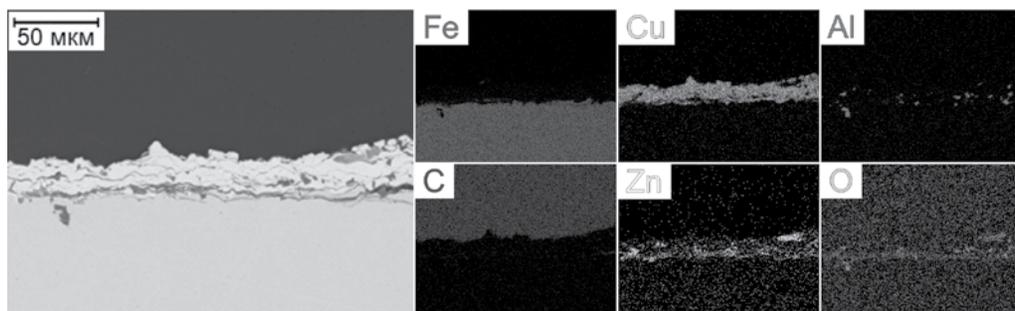


Рис. 4. СЭМ-изображение поперечного шлифа образца SC и карты распределения элементов

плотностью нанесения УПТФЭ в сравнении с образцом, для которого нанесение УПТФЭ проводилось фрикционным способом (рис. 3, SC-FF). УПТФЭ, нанесенный методом ХГН, заполнил большее число дефектов на поверхности, чем слой полимера, нанесенный FF-способом.

Коррозионную стойкость полученных покрытий оценивали методами электрохимической импедансной спектроскопии и потенциодинамической поляризации (табл. 1).

Таблица 1

Электрохимические параметры исследуемых образцов, полученные по результатам анализа импедансных спектров и поляризационных кривых

| Тип покрытия | β_a , мВ/декада | $-\beta_c$, мВ/декада | I_c , мкА·см ⁻² | E_c , мВ (отн. Ag/AgCl) | R_p , Ом·см ² | $ Z _{f=0,1 \text{ Гц}}$, Ом·см ² |
|---------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------------|------------------------------|-------------------------------|--|
| S | 51,26 | 284,22 | 14,2 | -436,9 | $4,72 \cdot 10^3$ | $3,25 \cdot 10^2$ |
| SC | 22,30 | 264,22 | 11,5 | -946,1 | $2,45 \cdot 10^3$ | $1,17 \cdot 10^3$ |
| SC-500 | 128,33 | 327,97 | 3,73 | -240,1 | $1,29 \cdot 10^4$ | $1,05 \cdot 10^4$ |
| SC-500-FF | 346,85 | 211,71 | 0,85 | -294,2 | $4,06 \cdot 10^4$ | $5,33 \cdot 10^4$ |
| SC-500-FF-350 | 519,23 | 226,73 | 0,52 | -273,1 | $9,84 \cdot 10^4$ | $8,49 \cdot 10^4$ |
| SC-FF | 104,15 | 146,87 | 0,46 | -203,5 | $4,56 \cdot 10^4$ | $4,25 \cdot 10^4$ |
| SC-FCS | 233,49 | 241,24 | 6,09 | -372,3 | $6,48 \cdot 10^3$ | $7,34 \cdot 10^3$ |

Методом потенциодинамической поляризации было установлено смещение потенциала коррозии в катодную область для образца SC по отношению к стали без покрытия (образец S) с $-436,8$ мВ до $-946,1$ мВ. Это обусловлено наличием цинка в составе покрытия. Zn, как более электрохимически активный металл, будет корродировать первым из компонентов покрытия и подложки. Отмечается также незначительное уменьшение плотности тока коррозии с $14,2$ мкА/см² для образца S до $11,5$ мкА/см² для образца SC. Дальнейшая обработка поверхности (термическое воздействие и формирование УПТФЭ-слоя) способствует повышению значения потенциала до $-203,5$ мВ и снижению плотности тока коррозии до $0,46$ мкА/см² (образец SC-FF).

Согласно данным электрохимической импедансной спектроскопии, термическая обработка образца SC при 500 °C (образец SC-500) формирует на поверхности дополнительный барьерный слой – наблюдается увеличение в 9 раз модуля импеданса на частоте $0,1$ Гц ($|Z|_{f=0,1 \text{ Гц}}$). Для образца SC-500-FF значение $|Z|_{f=0,1 \text{ Гц}}$ составляет $5,33 \cdot 10^4$ Ом·см². Сопоставимым по величине модуля импеданса является покрытие SC-FF ($4,25 \cdot 10^4$ Ом·см²), что указывает на близкие характеристики защитных свойств этих покрытий и на более высокую коррозионную стойкость покрытия SC-FF по сравнению с образцом SC-500 ($|Z|_{f=0,1 \text{ Гц}} = 1,05 \cdot 10^4$ Ом·см²). Дальнейшая термическая обработка образца SC-500-FF при 350 °C (SC-500-FF-350) способствует повышению защитных свойств получаемого покрытия, несмотря на удаление части УПТФЭ с поверхности ($|Z|_{f=0,1 \text{ Гц}} = 8,49 \cdot 10^4$ Ом·см²).

Следует отметить, что фрикционный метод нанесения УПТФЭ в большей степени усиливает защитные свойства покрытия по сравнению с методом холодного нанесения: $|Z|_{f=0,1 \text{ Гц}} = 7,34 \cdot 10^3$ Ом·см² для фрикционного способа (образец SC-FF) против $|Z|_{f=0,1 \text{ Гц}} = 4,25 \cdot 10^4$ Ом·см² для холодного газодинамического напыления (образец SC-FCS).

Данные результаты позволяют судить о положительном влиянии каждого компонента покрытия на защитные свойства получаемых покрытий. Наиболее эффективным оказалось покрытие, содержащее оксидный слой, полученный при термической обработке образца с медно-цинковым покрытием, и слой УПТФЭ, нанесенный фрикционным способом с последующим отжигом.

Выводы

Проведен сравнительный анализ защитных свойств покрытий, формируемых на стали Ст3 с использованием комбинации различных методов: холодного газодинамического напыления, фрикционной и термической обработки. Метод холодного газодинамического напыления позволяет сформировать плотный защитный слой на поверхности стали Ст3. Отмечено положительное влияние ультрадисперсного политетрафторэтилена на антикоррозионные свойства получаемых покрытий. Образец с УПТФЭ, нанесенным фрикционным методом на базовое медно-цинковое покрытие (образец SC-FF), показал большую устойчивость к коррозионным процессам ($I_c = 4,568 \cdot 10^{-7} \text{ А} \cdot \text{см}^{-2}$; $R_p = 4,56 \cdot 10^4 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$), чем образец с УПТФЭ, нанесенным методом напыления (образец SC-FCS) ($I_c = 6,093 \cdot 10^{-6} \text{ А} \cdot \text{см}^{-2}$; $R_p = 6,48 \cdot 10^3 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$), несмотря на большую долю на его поверхности УПТФЭ, от которого напрямую зависят защитные свойства композиционного покрытия. Лучшими антикоррозионными свойствами обладает образец, композиционное покрытие на котором формировали последовательно напылением базового медно-цинкового слоя, термической обработкой при 500 °С в течение 1 ч, нанесением УПТФЭ фрикционным методом, повторной обработкой при 350 °С в течение 1 ч ($|Z|_{f=0,1 \text{ Гц}} = 8,49 \cdot 10^4 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Adasooriya N.D., Hemmingsen T., Pavlou D. Environment-assisted corrosion damage of steel bridges: A conceptual framework for structural integrity // *Corrosion Reviews*. 2020. Vol. 38, № 1. P. 49–65.
2. Lazorenko G., Kasprzhitskii A., Nazdracheva T. Anti-corrosion coatings for protection of steel railway structures exposed to atmospheric environments: A review // *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 288. P. 123115.
3. Attaei M., Taryba M.G., Shakoor R.A., Kahraman R., Marques A.C., Montemor M.F. Highly protective polyolefin coating modified with ceria nano particles treated with N,N,N',N'-Tetrakis(2-hydroxyethyl) ethylenediamine for corrosion protection of carbon steel // *Corrosion Science*. 2022. Vol. 198. P. 110162.
4. Tabish M., Zhao J., Wang J., Anjum M.J., Qiang Y., Yang Q., Mushtaq M.A., Yasin G. Improving the corrosion protection ability of epoxy coating using CaAl LDH intercalated with 2-mercaptobenzothiazole as a pigment on steel substrate // *Progress in Organic Coatings*. 2022. Vol. 165. P. 106765.
5. Heimann R.B., Kleiman J.I., Litovsky E., Marx S., Ng R., Petrov S., Shagalov M., Sodhi R.N.S., Tang A. High-pressure cold gas dynamic (CGD)-sprayed alumina-reinforced aluminum coatings for potential application as space construction material // *Surface and Coatings Technology*. 2014. Vol. 252. P. 113–119.
6. Gnedenkov A.S., Mei D., Lamaka S.V., Sinebryukhov S.L., Mashtalyar D.V., Vyaliy I.E., Zheludkevich M.L., Gnedenkov S.V. Localized currents and pH distribution studied during corrosion of MA8 Mg alloy in the cell culture medium // *Corrosion Science*. 2020. Vol. 170. P. 108689.
7. Гнеденков С.В., Синебрюхов С.Л., Хрисанфова О.А., Егоркин В.С., Машталар Д.В., Сидорова М.В., Гнеденков А.С., Волкова Е.Ф. Свойства покрытий, сформированных на магниевом сплаве МА8 методом плазменного электролитического оксидирования // *Вестн. ДВО РАН*. 2010. № 5 (153). С. 35–46.

8. Gnedenkov A.S., Lamaka S.V., Sinebryukhov S.L., Mashtalyar D.V., Egorkin V.S., Imshinetskiy I.M., Zheludkevich M.L., Gnedenkov S.V. Control of the Mg alloy biodegradation via PEO and polymer-containing coatings // *Corrosion Science*. 2021. Vol. 182. P. 109254.
9. Tajabadipour H., Mohammadi-Manesh H., Shahidi-Zandi M. Experimental and theoretical studies of carbon steel corrosion protection in phosphoric acid solution by expired lansoprazole and rabeprazole drugs // *Journal of the Indian Chemical Society*. 2022. Vol. 99, N 1. P. 100285.
10. Seré P.R., Deyá C., Elsner C.I., Di Sarli A.R. Corrosion of painted galvanized steel // *Procedia Materials Science*. 2015. Vol. 8. P. 1–10.
11. Saarimaa V., Kaleva A., Ismailov A., Laihinén T., Virtanen M., Levänen E., Väisänen P. Corrosion product formation on zinc-coated steel in wet supercritical carbon dioxide // *Arabian Journal of Chemistry*. 2022. Vol. 15. N 3. P. 103636.
12. Gnedenkov A.S., Sinebryukhov S.L., Mashtalyar D.V., Imshinetskiy I.M., Vyaliy I.E., Gnedenkov S.V. Effect of microstructure on the corrosion resistance of TIG welded 1579 alloy // *Materials*. 2019. Vol. 12, № 16. P. 2615.
13. Gnedenkov A.S., Sinebryukhov S.L., Mashtalyar D.V., Gnedenkov S.V. Inhibitor-containing composite coatings on Mg alloys: Corrosion mechanism and self-healing protection // *Solid State Phenomena*. 2016. Vol. 245. P. 89–96.
14. Gnedenkov S.V., Sinebryukhov S.L., Sergienko V.I., Gnedenkov A.S. Composite peo-coatings as defence against corrosion and wear: A review // *Corrosion Science and Technology*. 2019. Vol. 18, N 5. P. 212–219.
15. Gnedenkov S.V., Sinebryukhov S.L., Egorkin V.S., Mashtalyar D.V., Vyaliy I.E., Nadaraia K.V., Imshinetskiy I.M., Nikitin A.I., Subbotin E.P., Gnedenkov A.S. Magnesium fabricated using additive technology: Specificity of corrosion and protection // *Journal of Alloys and Compounds*. 2019. Vol. 808. P. 151629.
16. Gnedenkov A., Sinebryukhov S., Mashtalyar D., Vyaliy I., Egorkin V., Gnedenkov S. Corrosion of the welded aluminium alloy in 0.5 M NaCl solution. Pt 2: Coating protection // *Materials*. 2018. Vol. 11, N 11. P. 2177.
17. Assadi H., Gärtner F., Stoltenhoff T., Kreye H. Bonding mechanism in cold gas spraying // *Acta Materialia*. 2003. Vol. 51, N 15. P. 4379–4394.
18. Poza P., Garrido-Maneiro M.Á. Cold-sprayed coatings: Microstructure, mechanical properties, and wear behaviour // *Progress in Materials Science*. 2022. Vol. 123. P. 100839.
19. Wu K., Sun W., Tan A.W.Y., Marinescu I., Liu E., Zhou W. An investigation into microstructure, tribological and mechanical properties of cold sprayed Inconel 625 coatings // *Surface and Coatings Technology*. 2021. Vol. 424. P. 127660.
20. Wang Q., Han P., Yin S., Niu W.J., Zhai L., Li X., Mao X., Han Y. Current research status on cold sprayed amorphous alloy coatings: A review // *Coatings*. 2021. Vol. 11, N 2. P. 206.
21. Zou Y. Cold spray additive manufacturing: Microstructure evolution and bonding features // *Accounts of Materials Research*. 2021. Vol. 2, № 11. P. 1071–1081.
22. Karthikeyan J. The advantages and disadvantages of the cold spray coating process // *The cold spray materials deposition process: Fundamentals and applications*. Woodhead Publ., 2007. P. 62–71.

REFERENCES

1. Adasooriya N.D., Hemmingsen T., Pavlou D. Environment-assisted corrosion damage of steel bridges: A conceptual framework for structural integrity. *Corros. Rev.* 2020;38(1):49-65. <https://doi.org/10.1515/corrrev-2019-0066>
2. Lazorenko G., Kasprzhitskii A., Nazdracheva T. Anti-corrosion coatings for protection of steel railway structures exposed to atmospheric environments: A review. *Constr. Build. Mater.* 2021;288:123115. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123115>
3. Attaei M., Taryba M.G., Shakoor R.A., Kahraman R., Marques A.C., Montemor M.F. Highly protective polyolefin coating modified with ceria nano particles treated with N,N,N',N'-Tetrakis(2-hydroxyethyl)ethylenediamine for corrosion protection of carbon steel. *Corros. Sci.* 2022;198:110162. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2022.110162>
4. Tabish M., Zhao J., Wang J., Anjum M.J., Qiang Y., Yang Q., et al. Improving the corrosion protection ability of epoxy coating using CaAl LDH intercalated with 2-mercaptobenzothiazole as a pigment on steel substrate. *Prog. Org. Coatings*. 2022;165:106765. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2022.106765>

5. Heimann R.B., Kleiman J.I., Litovsky E., Marx S., Ng R., Petrov S., et al. High-pressure cold gas dynamic (CGD)-sprayed alumina-reinforced aluminum coatings for potential application as space construction material. *Surf. Coatings Technol.* 2014;252:113-119. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.04.053>
6. Gnedenkov A.S., Mei D., Lamaka S.V., Sinebryukhov S.L., Mashtalyar D.V., Vyaliy I.E., et al. Localized currents and pH distribution studied during corrosion of MA8 Mg alloy in the cell culture medium. *Corros. Sci.* 2020;170:108689. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2020.108689>
7. Gnedenkov S.V., Sinebryukhov S.L., Chrisanfova O.A., Egorkin V.S., Mashtalyar D.V., Sidorova M.V., et al. Properties of coatings formed on magnesium alloy MA8 by plasma electrolytic oxidation. *Vestnik of the FEB RAS.* 2010;(5(153)):35-46. (In Russ.).
8. Gnedenkov A.S., Lamaka S.V., Sinebryukhov S.L., Mashtalyar D.V., Egorkin V.S., Imshinetskiy I.M., et al. Control of the Mg alloy biodegradation via PEO and polymer-containing coatings. *Corros. Sci.* 2021;182:109254. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2021.109254>
9. Tajabadipour H., Mohammadi-Manesh H., Shahidi-Zandi M. Experimental and theoretical studies of carbon steel corrosion protection in phosphoric acid solution by expired lansoprazole and rabeprazole drugs. *J. Indian Chem. Soc.* 2022;99(1):100285. <https://doi.org/10.1016/j.jics.2021.100285>
10. Seré P.R., Deyá C., Elsner C.I., Di Sarli A.R. Corrosion of painted galvanized steel. *Procedia Mater. Sci.* 2015;8:1-10. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2015.04.042>
11. Saarimaa V., Kaleva A., Ismailov A., Laihinén T., Virtanen M., Levänen E., et al. Corrosion product formation on zinc-coated steel in wet supercritical carbon dioxide. *Arab. J. Chem.* 2022;15(3):103636. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2021.103636>
12. Gnedenkov A.S., Sinebryukhov S.L., Mashtalyar D.V., Imshinetskiy I.M., Vyaliy I.E., Gnedenkov S.V. Effect of microstructure on the corrosion resistance of TIG welded 1579 alloy. *Materials.* 2019;12(16):2615. <https://doi.org/10.3390/ma12162615>
13. Gnedenkov A.S., Sinebryukhov S.L., Mashtalyar D.V., Gnedenkov S.V. Inhibitor-containing composite coatings on Mg alloys: Corrosion mechanism and self-healing protection. *Solid State Phenom.* 2016;245:89-96. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.245.89>
14. Gnedenkov S.V., Sinebryukhov S.L., Sergienko V.I., Gnedenkov A.S. Composite peo-coatings as defence against corrosion and wear: A review. *Corros. Sci. Technol.* 2019;18(5):212-219. <https://doi.org/10.14773/cst.2019.18.5.212>
15. Gnedenkov S.V., Sinebryukhov S.L., Egorkin V.S., Mashtalyar D.V., Vyaliy I.E., Nadaraia K.V., et al. Magnesium fabricated using additive technology: Specificity of corrosion and protection. *J. Alloys Compd.* 2019;808:151629. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.07.341>
16. Gnedenkov A., Sinebryukhov S., Mashtalyar D., Vyaliy I., Egorkin V., Gnedenkov S. Corrosion of the welded aluminium alloy in 0.5 M NaCl solution. Pt 2: Coating protection. *Materials.* 2018;11(11):2177. <https://doi.org/10.3390/ma11112177>
17. Assadi H., Gärtner F., Stoltenhoff T., Kreye H. Bonding mechanism in cold gas spraying. *Acta Mater.* 2003;51(15):4379-4394. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(03\)00274-X](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(03)00274-X)
18. Poza P., Garrido-Maneiro M.Á. Cold-sprayed coatings: Microstructure, mechanical properties, and wear behaviour. *Prog. Mater. Sci.* 2022;123:100839. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2021.100839>
19. Wu K., Sun W., Tan A.W.Y., Marinescu I., Liu E., Zhou W. An investigation into microstructure, tribological and mechanical properties of cold sprayed Inconel 625 coatings. *Surf. Coatings Technol.* 2021;424:127660. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127660>
20. Wang Q., Han P., Yin S., Niu W.J., Zhai L., Li X., et al. Current research status on cold sprayed amorphous alloy coatings: A review. *Coatings.* 2021;11(2):206. <https://doi.org/10.3390/coatings11020206>
21. Zou Y. Cold Spray additive manufacturing: Microstructure evolution and bonding features. *Accounts Mater. Res.* 2021;2(11):1071-1081. <https://doi.org/10.1021/accountsmr.1c00138>
22. Karthikeyan J. The advantages and disadvantages of the cold spray coating process. *The cold spray materials deposition process: Fundamentals and applications.* Woodhead Publ.; 2007. P. 62-71. <https://doi.org/10.1533/9781845693787.1.62>