

**ПОЛУЧЕНИЕ ПРОТИВОКОРРОЗИОННЫХ ПОКРЫТИЙ
НА ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛОВ ПУТЕМ ГАЗОТЕРМИЧЕСКОГО
НАПЫЛЕНИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ НАНОЧАСТИЦ ZnO,
СИНТЕЗИРОВАННЫХ В ПЛАЗМЕННОМ РАЗРЯДЕ
ПОД ДЕЙСТВИЕМ УЛЬТРАЗВУКА**

О.А. Бутусова¹

С.А. Ситников¹

Ю.Г. Михайлов²

В.А. Мамонов³

Н.А. Булычев^{1,3}

sitnikov.s.a@yandex.ru

mamonov_74@list.ru

nbulychev@mail.ru

¹МАИ, Москва, Российская Федерация

²НИУ МИЭТ, Москва, Российская Федерация

³ИФХЭ РАН, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Приведены результаты исследования возможности применения физических методов воздействия с высокой локальной концентрацией энергии, а именно плазменного разряда под действием интенсивного ультразвука и газотермической обработки, для синтеза керамических наночастиц и создания на их основе покрытий на поверхностях материалов. Для газотермической обработки варьировались состав газа (расход компонентов), его расход, дистанция обработки, время и температура воздействия. На примере оксида цинка показана возможность создания покрытий из наночастиц на поверхности стали. Наночастицы оксида цинка, синтезированные в плазменном разряде под действием ультразвука, охарактеризованы методом сканирующей электронной микроскопии. Размер частиц составлял 30...50 нм. Сформированные покрытия исследованы на металлографическом микроскопе, получены данные о толщине и структуре покрытия. По микрофотографиям установлено, что полученное покрытие достаточно однородно, структура покрытия на подложке и материал покрытия после отслоения от подложки являются целостными. Проведенные исследования позволили подтвер-

Ключевые слова

Плазма, ультразвук, покрытие, наночастицы, оксид цинка, керамика

дить, что нанесение наночастиц керамических материалов на поверхность стали при ее газотермической обработке позволяет получить покрытие, которое может на некоторое время препятствовать коррозионным процессам

Поступила 19.04.2024

Принята 06.06.2024

© Автор(ы), 2025

Работа выполнена в рамках научно-исследовательской темы (2022–2024): «Химическая стойкость материалов, защита металлов и других материалов от коррозии и окисления» (рег. № ЕГИСУ 122011300078-1, № ФФЗС-2022-0013)

Введение. Поверхностная обработка материалов концентрированными потоками энергии (электронным лучом, лазерным излучением, плазменной дугой, газотермическим воздействием) является перспективной с позиции направленного изменения свойств поверхности, в частности ее очистки и создания наноструктурированных покрытий [1–3]. В настоящее время технологические процессы, в которых материал подвергают воздействию концентрированных потоков энергии в виде электронного луча, лазера, плазмы и пламени (сварка, наплавка, резка, упрочнение, напыление), достаточно распространены в промышленности [4–7].

По плотности энергии плазменный источник находится в промежуточном положении между электродуговыми и лучевыми (электронно-лучевыми и лазерными) источниками энергии [3]. Он позволяет получать более высокую температуру и плотность теплового потока на обрабатываемой поверхности по сравнению с дуговыми источниками, уступает лучевым по концентрации энергии, но превосходит их по технико-экономическим показателям и доступности технического воплощения. Регулированием температурно-скоростных режимов плазменной поверхностной обработки и применением различных плазмообразующих газов можно изменять свойства поверхности за счет инициирования различных плазмохимических реакций и структурно-фазовых превращений [3].

Недостатком процесса газоплазменной обработки является то, что перед процессом поверхности должны быть предварительно очищены от загрязнений, поскольку их наличие приводит к образованию микродуг при плазменной обработке и, следовательно, к формированию раковин на поверхности изделий. Еще одним недостатком газоплазменной обработки является то, что плазменная струя, обладая высокой температурой и значительной концентрацией энергии, весьма быстро нагревает поверхностные слои обрабатываемого изделия при недостаточном прогреве материала и тем самым часто приводит к возникновению внутренних

напряжений и усталостных дефектов материала. Кроме того, в результате высокой скорости истечения плазменной струи и значительного давления на обрабатываемую поверхность может произойти нарушение слоя покрытия.

По сравнению с газоплазменной газотермической обработка имеет несколько преимуществ в качестве метода воздействия на поверхности. Это простота и низкая цена оборудования и его эксплуатации, небольшая потребляемая мощность, малые габариты, пригодные для переноски и транспортировки, недорогие расходные материалы. Портативность и высокая производительность методов газотермической обработки позволяют обрабатывать поверхности больших размеров даже в полевых условиях. В качестве топлива используют ацетилен, водород, пропан и др. [8, 9].

Суть процесса газотермической обработки заключается в генерации пламени из смеси газа контролируемого состава в виде цилиндрического факела с регулируемой длиной и диаметром и воздействии этого пламени на обрабатываемую поверхность. Возникающий тепловой поток приводит к нагреву поверхности [10, 11].

Газотермическая обработка так же, как и порошковое напыление, используется для получения защитных металлсодержащих покрытий на разнообразных поверхностях (металлы, стекло, полимерные материалы). Кроме защитных функций, покрытия могут иметь и другие функциональные назначения, например создание термобарьера, обеспечение электроизоляционных свойств, поглощение излучения продуктов радиоактивного распада, обеспечение определенных оптических свойств, получение селективного смачивания и др. [12–15].

Материалы и методы. Для создания покрытий на поверхности стали Ст3 использованы наночастицы оксида цинка, синтезированные в плазменном разряде в жидкости под действием интенсивной ультразвуковой кавитации [16–18]. Параметры синтеза: постоянный ток 3...8 А, напряжение 40...80 В, удельная мощность ультразвука 1...1,5 Вт/см³. Размер частиц 30...50 нм.

Для исследования наночастиц оксида цинка из покрытий на поверхности стали использовали металлографический микроскоп *Altami 9* и сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) *Carl Zeiss Supra 40-30-87*.

Оборудование для газотермической обработки: газовая установка с питателем *Powder Gun 5PM-II*, набор насадок с соплом различного диаметра, баллоны с газом. Для газотермической обработки варьировались

состав газа (расход компонентов), его расход, дистанция обработки, время и температура воздействия. Для используемого оборудования параметры газотермической обработки могут изменяться в следующих пределах: смесь пропан–кислород + кислород воздуха, температура 2000...2500 °С, давление 1,5...3,5 атм, дистанция обработки 150...300 мм, время воздействия 5...120 с.

Как уже было отмечено, при газотермической обработке происходит генерация теплового потока из смеси газов контролируемого состава в виде цилиндрического факела с регулируемой длиной и диаметром и воздействие этого потока на обрабатываемую поверхность. Возникающий тепловой поток приводит к нагреву поверхности и переносу на нее наночастиц порошка, подаваемого в горелку вместе с газом-носителем. Схема газотермической обработки поверхности материалов и фотография этого процесса приведены на рис. 1.

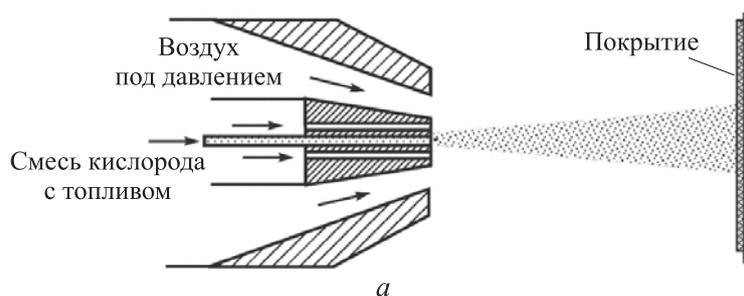


Рис. 1. Схема газотермической обработки поверхности материалов (а) и фотография (б) этого процесса

Параметры газотермической обработки выбирают исходя из размеров обрабатываемой поверхности и температуры, при которой происходит нанесение покрытий из наночастиц, присутствующих в газовом потоке. Важным преимуществом газотермической обработки, по сравнению с газоплазменной, является то, что активная зона воздействия имеет большие размеры и может регулироваться режимами обработки: давлением и расходом рабочего газа. Это и позволяет обрабатывать поверхности большей площади.

Результаты. Газотермическая обработка поверхностей позволяет, кроме их очистки, создавать на поверхности тонкие покрытия из различных материалов. Газотермическое напыление — распространенная технология для нанесения функциональных покрытий (износостойких, коррозионно-стойких, антифрикционных и т. п.). Газотермическое напыление подразумевает процесс нагрева, диспергирования и переноса конденсированных частиц распыляемого материала газовым или плазменным потоком для формирования на подложке слоя требуемого материала [8–10].

Материалом покрытий могут служить мелкодисперсные частицы разного состава (металл, керамика и т. д.), поэтому для создания покрытий можно использовать специально синтезированные наноразмерные частицы. Результаты исследований [16–18] показали, что некоторые наночастицы, синтезированные в плазменном разряде под действием ультразвука, обладают интересными функциональными характеристиками. В связи с этим значительный интерес представляет получение покрытия из таких наночастиц на поверхности стали. Если наночастицы, нанесенные на поверхность, сохраняют свои свойства, то процесс газотермической обработки может совмещать две функции: 1) обработку поверхности в целях ее очистки; 2) одновременное создание покрытия, которое на некоторое время сможет противостоять коррозионным процессам под действием соединений, попадающих на поверхность из окружающей среды. Немаловажен тот факт, что эти технологии могут быть применены к совершенно разным схемам и системам [19–24].

Для проверки этого предположения методом газотермической обработки нанесены покрытия из наночастиц оксида цинка, синтезированных в плазменном разряде под действием ультразвука, на поверхность пластины из стали Ст3. Фотография наночастиц оксида цинка ZnO (рис. 2), синтезированных в плазменном разряде под действием ультразвука, получена на СЭМ.

Напыление проведено с использованием смеси горючего газа (пропана), кислорода и воздуха. Режим напыления: 1,8 атм воздуха, расход кислорода 40 л/мин, расход пропана 30 л/мин, давление пропана (входящее) 2 атм, давление кислорода



Рис. 2. СЭМ-изображение наночастиц оксида цинка ZnO, использованных для нанесения покрытий

(входящее) 3,5 атм; дистанция напыления 170...180 мм. Температура горения 2700 °С, температуру пластины контролировали с использованием пирометра и она не превышала 150 °С. Число этапов напыления: пять (для исключения перегрева образца).

Получены стальные пластины, покрытые наночастицами оксида цинка. Для сравнительного исследования обработки поверхности покрытие наносили только на часть поверхности пластины, в результате чего на пластине образовались три зоны: 1) поверхность без покрытия; 2) поверхность с покрытием; 3) промежуточная зона с частичным покрытием (рис. 3, *а*). Покрытия исследованы на металлографическом микроскопе (рис. 3, *б*).

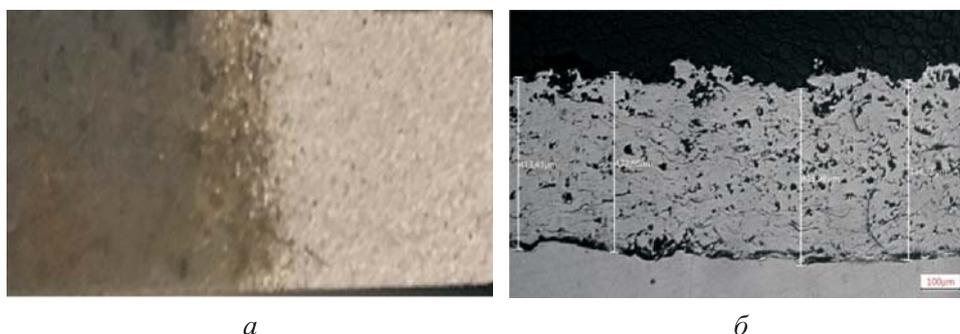


Рис. 3. Пластина с частичным покрытием из наночастиц оксида цинка (*а*) и микрофотография шлифа покрытия на поверхности пластины (*б*)

По микрофотографии (см. рис. 3, *б*) установлено, что полученное покрытие достаточно однородное. Относительно высокую плотность можно объяснить малым размером напыляемых частиц (обычно для газотермического напыления используют фракции порошков 50...100 мкм).

После нанесения покрытия оно механически отслоено от подложки и частицы исследованы методом СЭМ (рис. 4). Таким образом, результаты исследования агломератов керамических частиц после их отслоения от подложки показали, что материал покрытия является достаточно целостным, видимые полости и дефекты отсутствуют. Проведенные исследования позволили подтвердить следующее: нанесение наночастиц керамики на поверхность при ее газотермической обработке позволяет сформировать покрытие, которое может на некоторое время препятствовать коррозионным процессам.

Далее для оптимизации параметров газотермической обработки целесообразно провести аналитическое и численное моделирование процесса обработки как нестационарной задачи теплопереноса и рассмот-

реть модель из двух одномерных задач теплопроводности и двумерную модель в осесимметричной постановке. Задача нестационарного теплообмена может быть решена методом конечных элементов, при этом определена динамика изменения температуры в разных точках обрабатываемой поверхности.

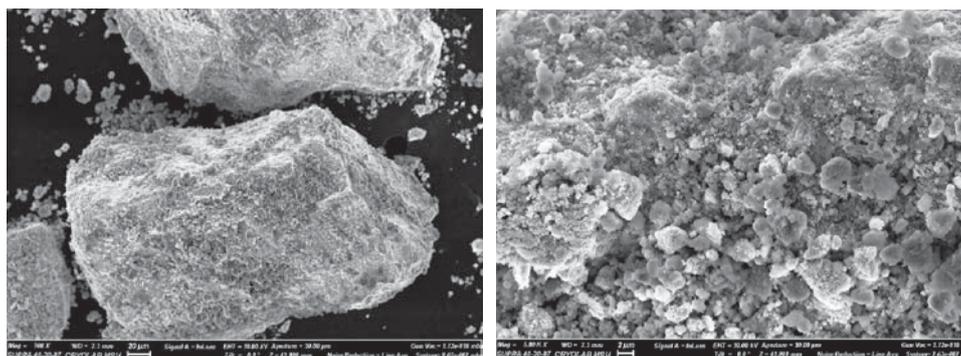


Рис. 4. СЭМ-изображение агломератов частиц оксида цинка после отслоения от подложки

Следовательно, используя такой алгоритм и задавая параметры газотермической обработки (состав рабочего газа, скорость и температуру факела, геометрические размеры факела), свойства обрабатываемого материала и среды, можно рассчитать время достижения температуры, требуемой для нанесения покрытий в любой точке поверхности, вычислить скорость, с которой следует перемещать источник относительно поверхности, а также время обработки всей поверхности заданного размера.

Заключение. Методом газотермической обработки нанесены покрытия из наночастиц оксида цинка, синтезированных в плазменном разряде под действием ультразвука, на поверхность пластины из стали. Показано, что структура покрытия на подложке и материал покрытия после отслоения от подложки являются достаточно целостными и однородными. Таким образом, нанесение наночастиц на поверхность при ее газотермической обработке может позволить на некоторое время препятствовать коррозионным процессам на поверхности.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Bach F.W., Möhwald K., Laarmann A., et al. Modern surface technology. Wiley, 2006.
- [2] Лащенко Г.И. Плазменное упрочнение и напыление. Киев, Екотехнологія, 2003.
- [3] Кудинов В.В. Плазменные покрытия. М., Наука, 1977.

- [4] Vysohlid M., Heberlein J. Investigation of arc voltage fluctuations in a plasma torch SG-100 operated with Ar/H₂. *ITSC*, 2004, pp. 998–1003.
DOI: <https://doi.org/10.31399/asm.cp.itsc2004p0998>
- [5] Drulko M., Forster G., Landes K.D., et al. Plasma torch developments. *ITSC*, 2005, pp. 431–434. DOI: <https://doi.org/10.31399/asm.cp.itsc2005p0431>
- [6] Newbery A.P., Grant P.S. Arc sprayed steel: microstructure in severe substrate features. *J. Therm. Spray Tech.*, 2009, vol. 18, no. 2, pp. 256–271.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s11666-009-9300-y>
- [7] Wilden J., Bergmann J.P., Jahn S., et al. Investigation about the chrome steel wire arc spray process and the resulting coating properties. *J. Therm. Spray Tech.*, 2007, vol. 16, no. 5-6, pp. 759–767. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11666-007-9114-8>
- [8] Siegmann S., Abert C. 100 years of thermal spray: about the inventor Max Ulrich Schoop. *Surf. Coat. Technol.*, 2013, vol. 220, pp. 3–13.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.10.034>
- [9] Hartman S. [The history of thermal spraying — from Max Ulrich Schoop to the present day]. *9th Colloquium HVOF spraying. Proc.*, Erding, 2012.
- [10] Алхимов А.П., Косарев В.Ф., Плохов А.В. Научные основы технологии холодного газодинамического напыления и свойства напыленных материалов. Новосибирск, НГТУ, 2006.
- [11] Baranovsky V., Baranovsky A. Supersonic material flame spray method and apparatus. Patent US 20110229649. Accept. 22.03.2010, Publ. 22.09.2011.
- [12] Bach Fr.-W., Engl L., Bach C., et al. Evaluation of modern HVOF systems concerning the application of hot corrosion protective coatings. *ITSS*, 2003, pp. 519–527.
DOI: <https://doi.org/10.31399/asm.cp.itsc2003p0519>
- [13] Rusch W. Thermal spray global coating solutions. ASM International, 2007.
- [14] Алхимов А.П., Клинков С.В., Косарев В.Ф. и др. Холодное газодинамическое напыление. Теория и практика. М., ФИЗМАТЛИТ, 2010.
- [15] Davis J.R. Handbook of thermal spray technology. ASM International, 2004.
- [16] Bulychev N.A. Preparation of stable suspensions of ZnO nanoparticles with ultrasonically assisted low-temperature plasma. *NTIJ*, 2021, vol. 12, iss. 3, pp. 91–97.
DOI: <https://doi.org/10.1615/NanoSciTechnolIntJ.2021038033>
- [17] Bulychev N.A. Study of interaction of surface-active polymers with zinc oxide nanoparticles synthesized in ultrasonically assisted plasma discharge. *NTIJ*, 2022, vol. 13, iss. 1, pp. 55–65. DOI: <https://doi.org/10.1615/NanoSciTechnolIntJ.2021038100>
- [18] Булычев Н.А., Михайлов Ю.Г. Получение полимерных композиционных материалов на основе наночастиц оксида цинка, синтезированных в плазменном разряде под действием ультразвука. *РЭНСИТ*, 2023, т. 15, № 2, с. 161–168.
DOI: <https://doi.org/10.17725/rensit.2023.15.161>
- [19] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Developing a procedure for calculating physical processes in combined schemes of plasma magneto-inertial confinement. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.*, 2016, vol. 80, no. 5, pp. 598–602.
DOI: <https://doi.org/10.3103/S1062873816030217>

- [20] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Mathematical modeling of plasma dynamics for processes in capillary discharges. *Rus. J. Nonlin. Dyn.*, 2019, vol. 15, pp. 543–550.
DOI: <https://doi.org/10.20537/nd190413>
- [21] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V., Varaksin A.Yu. Computational and experimental modeling in magnetoplasma aerodynamics and high-speed gas and plasma flows (a review). *Aerospace*, 2023, vol. 10, iss. 8, art. 662.
DOI: <https://doi.org/10.3390/aerospace10080662>
- [22] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Numerical simulation of pulsed jets of a high-current pulsed surface discharge. *Comput. Therm. Sci.: Int. J.*, 2021, vol. 13, iss. 2, pp. 45–56.
DOI: <https://doi.org/10.1615/ComputThermalScien.2020034742>
- [23] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Numerical simulation of the interaction of a magnetoinertial fusion target with plasma and laser drivers. *High Temp.*, 2022, vol. 60, no. S1, pp. S7–S15. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0018151X21040143>
- [24] Twarog D., Ryzhkov S.V. Induction of a strong paramagnetic field inside partially ionized and weakly magnetized plasma by the $E \times B$ drift. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2018, no. 5 (80), pp. 45–53.
DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2018-5-45-53>

Бутусова Ольга Анатольевна — инженер кафедры физической химии МАИ (Российская Федерация, 125993, Москва, Волоколамское ш., д. 4).

Ситников Сергей Анатольевич — канд. техн. наук, доцент кафедры материаловедения МАИ (Российская Федерация, 125993, Москва, Волоколамское ш., д. 4).

Михайлов Юрий Геннадьевич — канд. техн. наук, советник при ректорате НИУ МИЭТ (Российская Федерация, 124498, Москва, Зеленоград, пл. Шокина, д. 1).

Мамонов Валерий Алексеевич — канд. юр. наук, советник дирекции ИФХЭ РАН (Российская Федерация, 119071, Москва, Ленинский пр-т, д. 31).

Булычев Николай Алексеевич — д-р хим. наук, заведующий кафедрой физической химии МАИ (Российская Федерация, 125993, Москва, Волоколамское ш., д. 4); старший научный сотрудник лаборатории окисления и пассивации металлов и сплавов ИФХЭ РАН (Российская Федерация, 119071, Москва, Ленинский пр-т, д. 31).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Бутусова О.А., Ситников С.А., Михайлов Ю.Г., и др. Получение противокоррозионных покрытий на поверхности металлов путем газотермического напыления керамических наночастиц ZnO, синтезированных в плазменном разряде под действием ультразвука. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2025, № 2 (119), с. 65–77. EDN: KLXXGD

**FABRICATION OF ANTI-CORROSION COATINGS
ON METAL SURFACES BY THERMAL SPRAYING OF CERAMIC ZnO
NANOPARTICLES SYNTHESIZED IN A PLASMA DISCHARGE
UNDER THE INFLUENCE OF ULTRASOUND**

O.A. Butusova¹

S.A. Sitnikov¹

Yu.G. Mikhaylov²

V.A. Mamonov³

N.A. Bulychev^{1,3}

sitnikov.s.a@yandex.ru

mamonov_74@list.ru

nbulychev@mail.ru

¹ MAI, Moscow, Russian Federation

² MIET, Moscow, Russian Federation

³ IPCE RAS, Moscow, Russian Federation

Abstract

In this article, a study was carried out on the possibility of using physical methods of influence with a high local energy concentration, namely: plasma discharge under the influence of intense ultrasound and thermal gas treatment for the synthesis of ceramic nanoparticles and the creation of coatings on material surfaces based on them. For thermal gas treatment, the gas composition (consumption of components), gas consumption, treatment distance, exposure time and temperature were varied. Using zinc oxide as an example, the possibility of creating coatings from nanoparticles on the surface of steel was shown. Zinc oxide nanoparticles synthesized in a plasma discharge under the influence of ultrasound were characterized by scanning electron microscopy. The particle size was 30–50 nm. The resulting coatings were examined using a metallographic microscope, and data on the thickness and structure of the coating were obtained. From the micrograph it is clear that a fairly uniform coating has been obtained, the structure of the coating on the substrate and the coating material after peeling off from the substrate are quite intact. The studies carried out made it possible to confirm that the application of nanoparticles of ceramic materials to the surface of steel during its gas-thermal treatment makes it possible to obtain a coating that can prevent corrosion processes for some time

Keywords

Plasma, ultrasound, coatings, nanoparticles, zinc oxide, ceramics

Received 19.04.2024

Accepted 06.06.2024

© Author(s), 2025

The work was carried out within the framework of R&D (2022–2024): “Chemical resistance of materials, protection of metals and other materials from corrosion and oxidation” (reg. no in EGISU 122011300078-1, no. FFZS-2022-0013)

REFERENCES

- [1] Bach F.W., Möhwald K., Laarmann A., et al. Modern surface technology. Wiley, 2006.
- [2] Lashchenko G.I. Plazmennoe uprochnenie i napylenie [Plasma hardening and sputtering]. Kiev, Ekotekhnologiya Publ., 2003.
- [3] Kudinov V.V. Plazmennye pokrytiya [Plasma coatings]. Moscow, Nauka Publ., 1977.
- [4] Vysohlid M., Heberlein J. Investigation of arc voltage fluctuations in a plasma torch SG-100 operated with Ar/H₂. *ITSC*, 2004, pp. 998–1003.
DOI: <https://doi.org/10.31399/asm.cp.itsc2004p0998>
- [5] Drulko M., Forster G., Landes K.D., et al. Plasma torch developments. *ITSC*, 2005, pp. 431–434. DOI: <https://doi.org/10.31399/asm.cp.itsc2005p0431>
- [6] Newbery A.P., Grant P.S. Arc sprayed steel: microstructure in severe substrate features. *J. Therm. Spray Tech.*, 2009, vol. 18, no. 2, pp. 256–271.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s11666-009-9300-y>
- [7] Wilden J., Bergmann J.P., Jahn S., et al. Investigation about the chrome steel wire arc spray process and the resulting coating properties. *J. Therm. Spray Tech.*, 2007, vol. 16, no. 5-6, pp. 759–767. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11666-007-9114-8>
- [8] Siegmann S., Abert C. 100 years of thermal spray: about the inventor Max Ulrich Schoop. *Surf. Coat. Technol.*, 2013, vol. 220, pp. 3–13.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.10.034>
- [9] Hartman S. [The history of thermal spraying — from Max Ulrich Schoop to the present day]. *9th Colloquium HVOF spraying. Proc.*, Erding, 2012.
- [10] Alkhimov A.P., Kosarev V.F., Plokhov A.V. Nauchnye osnovy tekhnologii kholodnogo gazodinamicheskogo napyleniya i svoystva napylennykh materialov [Scientific foundations of cold gas-dynamic spraying technology and properties of sprayed materials]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2006.
- [11] Baranovsky V., Baranovsky A. Supersonic material flame spray method and apparatus. Patent US 20110229649. Accept. 22.03.2010, Publ. 22.09.2011.
- [12] Bach Fr.-W., Engl L., Bach C., et al. Evaluation of modern HVOF systems concerning the application of hot corrosion protective coatings. *ITSS*, 2003, pp. 519–527.
DOI: <https://doi.org/10.31399/asm.cp.itsc2003p0519>
- [13] Rusch W. Thermal spray global coating solutions. ASM International, 2007.
- [14] Alkhimov A.P., Klinkov S.V., Kosarev V.F., et al. Kholodnoe gazodinamicheskoe napylenie. Teoriya i praktika [Cold gas dynamic spraying. Theory and practice]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2010.
- [15] Davis J.R. Handbook of thermal spray technology. ASM International, 2004.
- [16] Bulychev N.A. Preparation of stable suspensions of ZnO nanoparticles with ultrasonically assisted low-temperature plasma. *NTIJ*, 2021, vol. 12, iss. 3, pp. 91–97.
DOI: <https://doi.org/10.1615/NanoSciTechnolIntJ.2021038033>

- [17] Bulychev N.A. Study of interaction of surface-active polymers with zinc oxide nanoparticles synthesized in ultrasonically assisted plasma discharge. *NTIJ*, 2022, vol. 13, iss. 1, pp. 55–65. DOI: <https://doi.org/10.1615/NanoSciTechnolIntJ.2021038100>
- [18] Bulychev N.A., Mikhaylov Yu.G. Synthesis of polymer composite materials based on zinc oxide nanoparticles synthesized in a plasma discharge under the ultrasonic action. *RENSIT*, 2023, vol. 15, no. 2, pp. 161–168 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.17725/rensit.2023.15.161>
- [19] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Developing a procedure for calculating physical processes in combined schemes of plasma magneto-inertial confinement. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.*, 2016, vol. 80, no. 5, pp. 598–602. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1062873816030217>
- [20] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Mathematical modeling of plasma dynamics for processes in capillary discharges. *Rus. J. Nonlin. Dyn.*, 2019, vol. 15, pp. 543–550. DOI: <https://doi.org/10.20537/nd190413>
- [21] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V., Varaksin A.Yu. Computational and experimental modeling in magnetoplasma aerodynamics and high-speed gas and plasma flows (a review). *Aerospace*, 2023, vol. 10, iss. 8, art. 662. DOI: <https://doi.org/10.3390/aerospace10080662>
- [22] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Numerical simulation of pulsed jets of a high-current pulsed surface discharge. *Comput. Therm. Sci.: Int. J.*, 2021, vol. 13, iss. 2, pp. 45–56. DOI: <https://doi.org/10.1615/ComputThermalScien.2020034742>
- [23] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Numerical simulation of the interaction of a magneto-inertial fusion target with plasma and laser drivers. *High Temp.*, 2022, vol. 60, no. S1, pp. S7–S15. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0018151X21040143>
- [24] Twarog D., Ryzhkov S.V. Induction of a strong paramagnetic field inside partially ionized and weakly magnetized plasma by the $E \times B$ drift. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2018, no. 5 (80), pp. 45–53. DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2018-5-45-53>

Butusova O.A. — Engineer, Department of Physical Chemistry, MAI (Volokolamskoe shosse 4, Moscow, 125993 Russian Federation).

Sitnikov S.A. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Material Science, MAI (Volokolamskoe shosse 4, Moscow, 125993 Russian Federation).

Mikhaylov Yu.G. — Cand. Sc. (Eng.), Advisor, Rector Office, MIET (Shokina ploshchad 1, Zelenograd, Moscow, 124498 Russian Federation).

Mamonov V.A. — Cand. Sc. (Law), Advisor, Director Office, IPCE RAS (Leninskiy prospekt 31, Moscow, 119071 Russian Federation).

Bulychev N.A. — Dr. Sc. (Chem.), Head of the Department of Physical Chemistry, MAI (Volokolamskoe shosse 4, Moscow, 125993 Russian Federation); Senior Researcher, Laboratory of Oxidation and Passivation of Metals and Alloys, IPCE RAS (Leninskiy prospekt 31, Moscow, 119071 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Butusova O.A., Sitnikov S.A., Mikhaylov Yu.G., et al. Fabrication of anti-corrosion coatings on metal surfaces by thermal spraying of ceramic ZnO nanoparticles synthesized in a plasma discharge under the influence of ultrasound. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2025, no. 2 (119), pp. 65–77 (in Russ.). EDN: KLXXGD