

Исследование влияния режимов нанесения на коррозионные и эксплуатационные свойства покрытий

В.В. Трубников^{1а}, С.В. Ганин^{2б}, С.А. Блинов^{2с}, А.М. Левитский^{2д}, В.А. Соколова^{1е}, В.А. Марков^{1ф}

¹ Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, Высшая школа технологии и энергетики, ул. Ивана Черных 4, Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, ул. Политехническая 29, Санкт-Петербург, Россия

^а victor_trubnikov@mail.ru, ^б ganin_sv@spbstu.ru, ^с blinov_sa@spbstu.ru, ^д levitskij_am@spbstu.ru,

^е sokolova_vika@inbox.ru, ^ф mactor85@mail.ru

^а <https://orcid.org/0009-0004-8448-1928>, ^б <https://orcid.org/0000-0002-2307-9319>, ^с <https://orcid.org/0009-0005-2017-8249>,

^д <https://orcid.org/0009-0009-7900-4007>, ^е <https://orcid.org/0000-0001-6880-445X>, ^ф <https://orcid.org/0000-0002-4986-4155>

Статья поступила 12.01.2026, принята 29.04.2026

В работе было изучено влияние режимов нанесения покрытий методом холодного газодинамического напыления на механические и коррозионные свойства. Для определения степени оказанного влияния было проведено три вида механических испытаний, а именно: трёхточечный изгиб, отрыв покрытия и резкое изменение температуры. Коррозионное испытание было проведено в камере соляного тумана со следующими параметрами: атмосфера раствора хлористого натрия в концентрации (50±1) г/дм³, температура 40±5 °С, влажность 95–99 % (10 минут распыление тумана каждые 45 минут). Материалом для нанесения была выбрана готовая порошковая смесь фирмы «Димет» Z-00-11, состоящая из цинка, сферической формы, и корунда, с осколочной морфологией частиц в соотношении 1:1. Нанесение осуществлялось в автоматическом режиме на двухкоординатном станке с ЧПУ, в программе LaserGRBL при помощи заранее написанного на G-code алгоритма. В результате проведённого исследования было обнаружено, что при варьировании параметров нанесения, а именно скорости движения сопла, температура воздуха в сопле и шероховатости поверхности подложки, проявляются закономерности в сочетании параметров нанесения для получения требуемых свойств. Например, для повышения прочности сцепления необходимо увеличить шероховатость поверхности, одновременно снизив скорость перемещения сопла и температуру воздуха. В случае, если требуется повышенная стойкость покрытия к деформации, оптимальными будут низкая температура и высокая скорость нанесения, а также увеличенная шероховатость. Для повышения коррозионной стойкости рекомендуется увеличить температуру и шероховатость, при этом уменьшив скорость нанесения.

Ключевые слова: коррозия; скорость нанесения; хгдн; коррозионностойкие покрытия; шероховатость.

Study of the influence of application modes on the corrosion and operational properties of coatings

V.V. Trubnikov^{1а}, S.V. Ganin^{2б}, S.A. Blinov^{2с}, A.M. Levitsky^{2д}, V.A. Sokolova^{1е}, V.A. Markov^{1ф}

¹ St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, Higher School of Technology and Energy; 4, Ivan Chernykh St., St. Petersburg, Russia

² St. Petersburg State Polytechnic University; 29, Politekhnicheskaya St., St. Petersburg, Russia

^а victor_trubnikov@mail.ru, ^б ganin_sv@spbstu.ru, ^с blinov_sa@spbstu.ru, ^д levitskij_am@spbstu.ru,

^е sokolova_vika@inbox.ru, ^ф mactor85@mail.ru

^а <https://orcid.org/0009-0004-8448-1928>, ^б <https://orcid.org/0000-0002-2307-9319>, ^с <https://orcid.org/0009-0005-2017-8249>,

^д <https://orcid.org/0009-0009-7900-4007>, ^е <https://orcid.org/0000-0001-6880-445X>, ^ф <https://orcid.org/0000-0002-4986-4155>

Received 12.01.2026, accepted 29.04.2026

The study examines the influence of coating application modes using cold gas dynamic spraying on the mechanical and corrosion properties. To determine the extent of this influence, three types of mechanical tests are conducted: three-point bending, coating pull-off (adhesion test), and rapid temperature change (thermal shock). The corrosion test is carried out in a salt spray chamber under the following conditions: sodium chloride solution atmosphere at a concentration of (50±1) g/dm³, temperature of 40±5 °C, humidity of 95–99 % (with fog sprayed for 10 minutes every 45 minutes). The material selected for application is a ready-made powder mixture from Dimet, grade Z-00-11, consisting of spherical zinc and corundum with fragmented particle morphology in a 1:1 ratio. The coating is applied automatically using a two-coordinate CNC machine running the LaserGRBL software, following a pre-written G-code algorithm. As a result of the conducted research, it is found that by varying the application parameters, namely, the nozzle traverse speed, the air temperature in the nozzle, and the surface roughness of the substrate – certain patterns emerge in the combination of parameters needed to obtain the desired properties. For example, to increase adhesion strength, it is necessary to increase surface roughness while simultaneously reducing the nozzle traverse speed and air temperature. If higher coating resistance to deformation is required, low temperature and high application speed, together with increased roughness, are optimal. To enhance corrosion resistance, it is recommended to increase temperature and roughness while reducing the application speed.

Keywords: corrosion; application speed; cold spray; corrosion-resistant coating; roughness.

Введение. Одним из основных методов обеспечения защиты различных узлов, механизмов и конструкций от коррозионных процессов является нанесение специальных защитных покрытий в [1, 2]. Эти покрытия служат барьером, предотвращающим контакт металлических поверхностей с агрессивными средами, такими как вода, кислоты, соли и т. д. В результате этого значительно увеличивается срок службы оборудования и сокращаются затраты на ремонт и обслуживание.

Существует множество методов нанесения защитных покрытий, каждый из которых обладает своими уникальными преимуществами и применим в определенных ситуациях. История таких техник насчитывает более тысячи лет: первые упоминания о применении защитных покрытий для материалов появились ещё в древние времена. С тех пор технологии развивались, появлялись новые материалы и методы, чтобы повысить эффективность и надёжность защиты.

Особое предпочтение сегодня отдают методам, которые не оказывают термического воздействия на основной материал, потому что подобный подход позволяет сохранить исходные свойства поверхности, структуру и механическую прочность изделия. Сегодня, при рассмотрении способов без термического влияния, одним из наиболее перспективных и современных методов является холодное газодинамическое напыление (ХГДН) [3–15]. Этот способ основан на использовании сверхзвуковых потоков газа для нанесения тонкого слоя защитного материала без нагрева основной поверхности, что делает его особенно ценным для обработки чувствительных к температуре материалов. Благодаря этому, покрытие наносится равномерно и плотно, образуя сплошной слой. Таким образом, холодное газодинамическое напыление приобретает всё большую популярность в промышленности, особенно в тех отраслях, где важна сохранность исходных свойств материалов и долговечность изделий.

Существует четыре базовых варианта взаимодействия частицы с подложкой: «мягкое/мягкое» (одинаковая пластичность или твёрдость), «твёрдое/мягкое» (частица твёрже подложки), «мягкое/твёрдое» (частица более пластична, чем подложка) и «твёрдое/твёрдое» (одинаковая пластичность или твёрдость). В случаях, когда материалы сопоставимы по твердости преимущественно закрепление частицы обусловлено образованием металлических связей с подложкой. В случаях, когда твердость материалов сильно отличается наибольший эффект оказывает чисто механическое сцепление.

При любом из описанных вариантов образование металлической связи обусловлено преодолением определенных барьеров. Такие барьеры можно разделить на внешние и внутренние.

К внешним барьерам в первую очередь относятся оксидные пленки на поверхности частицы и подложки. Наличие таких пленок препятствует образованию металлической связи. Процесс формирования металлической связи обусловлен пластической деформацией частицы и подложки во время удара. Поскольку оксидные пленки гораздо менее пластичны чем основной материал, то во время пластической деформации слой оксидов разрушается и на поверхность выходят не окисленные слои материала. Разрушению оксидных пленок также способствует разница в коэффициентах

термического расширения оксидов и основного материала. Таким образом для образования металлической связи кинетическая энергия частицы должна быть больше энергии, необходимой для разрушения оксидных пленок. Экспериментально показано, что чем толще оксидные пленки, тем больше должна быть кинетическая энергия, т. е. скорость частицы.

К внутренним барьерам можно отнести состояние микроструктуры материала, т. е. все дефекты, приводящие к увеличению предела текучести материала такие как границы зерен, частицы второй фазы, неметаллические включения. Поры также можно отнести к внутренним барьерам так как при их закрытии в процесс пластической деформации необходимо затратить энергию.

Помимо барьеров на формирование связи оказывают влияние другие явления, происходящие на границе раздела, частица/подложка. Во время столкновения двух тел ударное давление будет нарастать вблизи точки столкновения – точка столкновения здесь относится к точке, где частица и подложка впервые соприкасаются. На ранней стадии безударного состояния точка столкновения, перемещается вперед вызванной ударной волны. Однако скорость точки столкновения со временем уменьшается, и при критическом угле удара скорость ударной волны также снижается. Это приводит к тому, что давление, возникающее за ударной волной, высвобождается на свободной поверхности за счет направленного наружу потока жидкости. Волна высвобождения или разрежения взаимодействует с ударной волной, создавая растягивающие напряжения внутри образца. Таким образом, разбрызгивание и отслаивание материала происходят, если индуцированное напряжение превышает динамическую прочность материала на отслаивание.

На формирование покрытия помимо физических процессов влияют и параметры нанесения. Давление и температура газа оказывают основное влияние на скорость частиц. Чем они выше, тем больше энергия удара, а, следовательно, и адгезия покрытия. В качестве газа чаще всего используют: воздух, азот или гелий. Наибольшее давление возможно получить в случае применения гелия, однако высокая стоимость этого газа ограничивает его применение. Более эффективным вариантом повышения давления газа является повышение температуры. Такая регулировка не требует применения дорогих компонентов.

Расход порошка влияет на среднюю скорость частиц в потоке газа. Чем меньше расход порошка, тем выше средняя скорость частиц в потоке. Помимо скорости потока, расход порошка определяет толщину наносимого слоя. Чем выше расход порошка, тем больше толщина слоя. Движение сопла определяет форму наносимого слоя. Известно, что скорость частиц на периферии потока меньше, чем в его центре. В связи с этим сечение нанесенной дорожки описывается функцией Гаусса. Чем ниже скорость движения сопла, тем более пологим является распределение. Помимо скорости движения сопла на формирование геометрии покрытия влияет шаг между соседними дорожками. Величина этого шага определяет общий рельеф покрытия. Расстояние от сопла до подложки также влияет на скорость частиц. Внутри ядра струи частицы подвер-

гаются воздействию положительных сил и, таким образом, быстро ускоряются. Однако на небольшом расстоянии после того, как газ выходит из расширяющейся части сопла, скорость газа замедляется до скорости, меньшей скорости частиц, и возникающая в результате отрицательная сила вызывает замедление частиц. В результате скорость удара частиц и эффективность осаждения увеличиваются по мере увеличения расстояния от подложки, но затем уменьшаются после достижения оптимальной рабочей точки. Последним, но не менее важным, технологическим параметром является угол нанесения покрытия. Угол напыления определяется как угол наклона центральной оси сопла к поверхности мишени. Он оказывает существенное влияние на векторные составляющие скорости удара частиц и, следовательно, на свойства наносимого материала. При распылении под углом, отличным от нормали к поверхности подложки, только нормальная составляющая скорости способствует смещению частиц, в то время как тангенциальная составляющая скорости может играть противоположную роль, потенциально отделяя осажденные частицы. При уменьшении угла напыления нормальная составляющая скорости уменьшается, но тангенциальная составляющая скорости увеличивается, что значительно снижает качество напыления. Эффективность напыления, прочность напыления и адгезия снижаются с уменьшением угла.

В работе было рассмотрено влияние режимов нанесения покрытия на его механические и коррозионные свойства. Нанесение покрытий осуществлялось в автоматизированном режиме при помощи станка с ЧПУ. В рамках данной автоматизации сопловой блок был закреплён на portalной раме с возможностью перемещения по двум координатам. Управление движением станка осуществлялось через встроенный блок управления с поддержкой программы LaserGRBL, интерфейс которой показан на рис. 1. Образцы крепились на магнитной плите. Внешний вид установки показан на рис. 2.

В LaserGRBL программирование в основном осуществляется через настройку параметров движения инструмента по двум координатам, которые пользователь задает вручную или загружает из предварительно подготовленных файлов. Программа поддерживает работу с G-code – стандартным языком команд для управления CNC-станками. Данная программа позволяет управлять устройством при помощи встроенных инструментов, находящихся на главном экране интерфейса.

Для более сложных задач есть возможность работы с G-code напрямую – загрузка, редактирование и сохранение команд вручную или через сторонние программы. Таким образом, в LaserGRBL можно программировать лазерные процессы как через графический интерфейс, так и через работу с G-code, что дает широкие возможности для точного и гибкого управления.

Как было сказано ранее, в LaserGRBL G-code служит основным средством передачи команд от компьютера к станку, определяя точные движения и параметры работы установки. В заранее заготовленной программе было прописано перемещение сопла ХГДН по 2 координатам, а также его скорость движения.

Движение сопла осуществлялось за счёт трёх шаговых моторов. Шаговые моторы – это разновидность

электродвигателей, которые преобразуют электрический сигнал в точечное механическое перемещение с фиксированным шагом.

Выбор этого типа двигателя обусловлен следующими особенностями:

1. Высокая точность позиционирования: каждый импульс сигнала приводит к определённому повороту вала, что обеспечивает высокую повторяемость и точность перемещения.

2. Простота управления: для управления применяется простая последовательность импульсов, что позволяет легко интегрировать их в автоматизированные системы.

3. Отсутствие обратной связи: большинство шаговых моторов работают по принципу открытого контура, без необходимости использования датчиков обратной связи.

4. Высокий крутящий момент при низких скоростях: идеально подходят для точного позиционирования с небольшой или средней скоростью движения.

Они часто используются в системах автоматизации, робототехнике, принтерах, 3D-принтерах и других устройствах, требующих высокой точности позиционирования и управления.

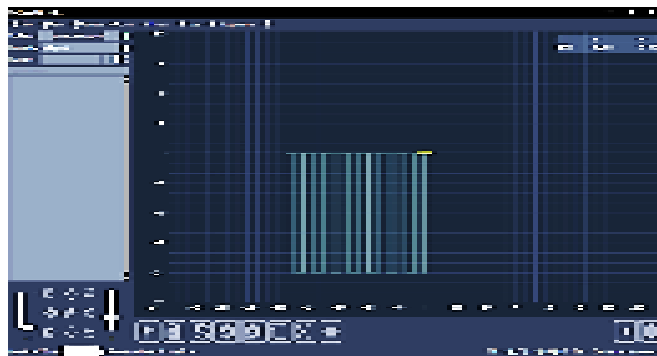


Рис. 1. Интерфейс программы LaserGRBL



Рис. 2. Установка холодного газодинамического напыления с низким давлением с чпу

Материалы и методика исследования. Исследования проводились на образцах: 100×20×3 мм; 50×20×3 мм; 30×20×3 мм, изготовленных из Ст3сп. Химический состав стали приведён в табл. 1.

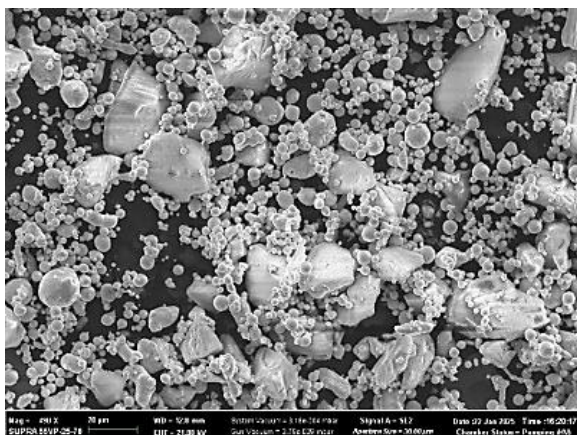
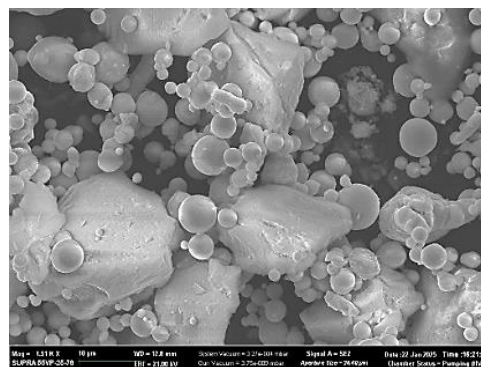
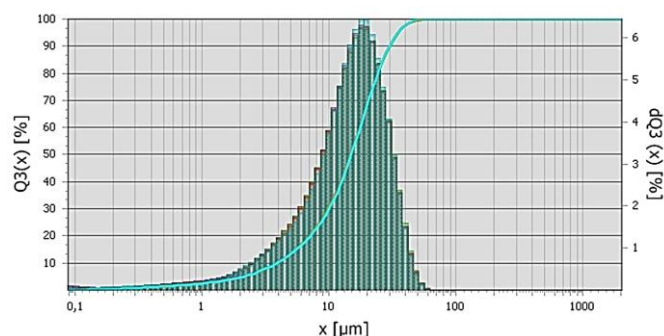
Таблица 1. Химический состав стали СтЗсп

Содержание элементов, масс. %							
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu
0,165	0,205	0,410	0,006	0,004	0,032	0,040	0,011

В качестве материала была выбрана готовая порошковая смесь фирмы «Димет» Z-00-11. Также был проведён анализ морфологии частиц порошка с помощью сканирующего электронного микроскопа Zeiss Supra 55VP (рис. 3). Съёмку проводили с использованием детектора SE, фотографии были сделаны на увеличениях 498 и 1510 крат. В порошковой смеси содержалось 2 вида порошка: частицы цинка (сферическая форма) и частицы корунда (осколочная), результат представлен на рис. 4 и 5. Для определения гранулометрического состава использованных порошковых смесей применяли лазерный гранулометр Fritsch Analysette 22 NanoTec plus (рис. 6). Анализатор представляет собой компактное универсальное лазерное устройство для определения размеров частиц вплоть до наномасштаба, пригодное для выполнения любых стандартных измерительных задач в диапазоне 0,01–2000 мкм.

Этот анализатор включает компактный измерительный блок, который легко и быстро комбинируется с различными диспергирующими блоками (дополнительными опциями) для проведения измерений в сухой или жидкой среде.

Процентный состав показан на рис. 7.

**Рис. 3.** Сканирующий электронный микроскоп Zeiss Supra 55VP**Рис. 4.** Фотография порошковой смеси Z-00-11 при увеличении 498 крат**Рис. 5.** Фотография порошковой смеси Z-00-11 при увеличении 1510 крат**Рис. 6.** Лазерный гранулометр fritsch analysette 22 nanotec plus**Рис. 7.** Гранулометрический состав порошковой смеси Z-00-11

С помощью установки «Димет – 405» и столика, оснащённого ЧПУ, были нанесены покрытия на стальную подложку. Напыление осуществлялось внутри камеры, оснащённой установкой Циклон.

«Димет 405» – это комплект оборудования для газодинамического напыления. Так как данная установка предназначена для работы с низким давлением, возможно нанесение покрытий лишь из мягких металлов, таких как медь, никель, цинк, алюминий и т. д. Установка позволяет регулировать скорость подачи материала, температуру воздуха, выходящего из сопла, и давление воздуха, подаваемое в сопло.

При газодинамическом методе нанесения покрытия часть порошковой смеси отскакивает от подложки и попадает в окружающее пространство. Из-за этого при нанесении покрытия в помещении необходимо использовать специальные боксы и системы фильтрации воздуха. В данном случае использовалась установка циклон, соединенная с камерой. Фильтровальная установка показана на рис. 8.



Рис. 8. Вытяжная установка циклон Powermatic PM2200

Для данного исследования было изготовлено 64 образца с разными параметрами нанесения: температура, скорость движения сопла и шероховатость. Варьирование параметров осуществлялось в следующих пределах:

- Температура: 280 °С и 440 °С.
- Скорость движения сопла: 750 мм/мин и 1500 мм/мин.
- Шероховатость: $R_z = 3,47$ мкм и $R_z = 7,17$ мкм.

Определение лучшего режима нанесения опиралось на следующие свойства, полученного покрытия:

1) Качество сцепления покрытия

Для определения данного параметра было проведено испытание, в основу которого легла методика из ГОСТ 9.304-87. Метод заключается в приклеивании контрообразца к образцу, с нанесённым на него покрытием, и последующем размещении полученной конструкции в разрывной машине, для определения силы сцепления покрытия и основного металла. В качестве контрообразца использовали болты М16, поскольку площадь их головки составляет 498,8 мм², что очень близко к требуемому по ГОСТу 490 мм². Для повышения прочности соединения поверхности контрообразца предали большую шероховатость путём пескоструйной обработки. В рамках данного исследования для проведения испытаний была выбрана скорость 5 мм/мин. Основным показателем при тестировании является усилие, необходимое для отрыва покрытия от стальной пластины по адгезионному механизму или для расслоения покрытия по когезионному механизму.

2) Допустимый угол изгиба, без повреждения покрытия

Испытание на трёхточечный изгиб позволило получить информацию о допустимой деформации детали, с нанесённым на неё покрытием, без образования трещин. Испытания проводят следующим образом: образец с нанесённым покрытием укладывают на две цилиндрические опоры, а в центре на него воздействует пуансон с округлой поверхностью в зоне контакта. Нагрузку при этом прикладывают до достижения предела текучести, что позволяет моделировать упругие деформации изделия. Визуальным осмотром определяют наличие или отсутствие трещин.

3) Прочность сцепления покрытия и основного металла

Данное испытание проводилось в соответствии с методикой, рекомендованной в ГОСТ 9.302-88. Метод изменения температуры применяется для оценки устойчивости покрытий на различных деталях. В ходе испытания образец с цинковым покрытием нагревают до 190 °С, выдерживают 15 минут, а затем быстро охлаждают, погружая в воду с температурой от 15 до 25 °С. После завершения испытания не допускается возникновение вздутий или отслаивания покрытия.

4) Коррозионная стойкость покрытия

Суть коррозионных испытаний – в ускорении коррозионного воздействия путём создания заданных условий. Для исследования было выбрано испытание в камере соляного тумана (рис. 10). В подобном виде испытаний можно задавать температуру, влажность и вид агрессивной среды. Были выбраны следующие параметры:

- атмосфера раствора хлористого натрия в концентрации (50 ± 1) г/дм³;
- температура 40 ± 5 °С;
- влажность 95–99 % (10 минут распыление тумана каждые 45 минут).



Рис. 10. Камера соляного тумана

Результаты исследования. По окончании каждого испытания проведён анализ полученных данных и выявлены следующие результаты.

По итогу испытаний на отрыв были получены следующие зависимости, результаты представлены в табл. 2. По данным видно, что уменьшение скорости движения сопла приводит к увеличению необходимого усилия для отрыва покрытия от подложки. С температурой наблюдается такая же зависимость, уменьшение температуры приводит к лучшему сцеплению покрытия. Для шероховатости видна обратная зависимость, увеличение R_z приводит к в разы возросшему значению усилия, нужного для отрыва.

В заключение, для увеличения силы сцепления цинкового покрытия, нанесённого методом ХГДН, необходимо увеличить шероховатость и уменьшить температуру и скорость движения сопла.

Таблица 2. Результаты испытания на отрыв

№ п/п	Скорость движения сопла, мм/мин	Температура, °С	Rz, мкм	Усилие для отрыва, Н	Фотография образца после испытания
1	750	440	3,47	885	
2	1500	440	3,47	346	
3	750	440	7,17	3030	
4	1500	440	7,17	1510	
5	750	280	7,17	3260	
6	1500	280	7,17	3250	
7	750	280	3,47	700	
8	1500	280	3,47	691	

В результате испытания на трёхточечный изгиб стали известны усилие и угол, при которых на покрытии появляются трещины, данные показаны в табл. 3.

Уменьшение скорости движения сопла ведёт к уменьшению усилия, необходимого для образования трещин, а также к меньшему углу, при котором покрытие трескается. Увеличение температуры приводит к уменьшению усилия, при котором появляются трещины. Зависимость влияния температуры и угла не оказалось. При увеличении шероховатости происходит увеличение необходимого усилия. Зависимости между углом изгиба и шероховатостью замечено не было.

В итоге для получения наибольшего усилия, необходимого для образования трещин в покрытие, во время изгиба скорость нанесения покрытия и шероховатость должны быть высокими, а температура низкой.

После визуального осмотра образцов, прошедших испытание на определения силы сцепления покрытия и основного металла, можно сделать следующие выводы. Результаты в табл. 4.

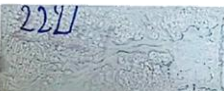
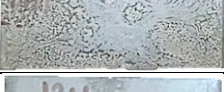
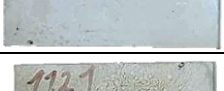
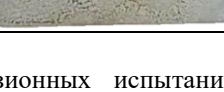
Таблица 3. Результаты испытания на трёхточечный изгиб

№ п/п	Скорость движения сопла, мм/мин	Температура, °С	Rz, мкм	Усилие, Н	Угол, °
1	750	440	3,47	3318	50
2	1500	440	3,47	4609	98
3	750	440	7,17	5670	20
4	1500	440	7,17	5481	117
5	750	280	7,17	5646	115
6	1500	280	7,17	5787	83
7	750	280	3,47	3812	31
8	1500	280	3,47	4614	121

В ходе испытания у всех образцов на покрытии появился рельеф, который при более детальном рассмотрении оказался расслоением покрытия. Стоит отметить, что отслоение покрытия от подложки не произошло.

При проверке силы сцепления покрытия и основного металла, методом резкой смены температуры, оказалось, что зависимости от скорости нанесения, температуры и шероховатости не наблюдается.

Таблица 4. Результаты испытания на прочность сцепления покрытия методом изменения температуры

№ п/п	Скорость движения сопла, мм/мин	Температура, °С	Rz, мкм	Фотография образца, после испытания
1	750	440	3,47	
2	1500	440	3,47	
3	750	440	7,17	
4	1500	440	7,17	
5	750	280	7,17	
6	1500	280	7,17	
7	750	280	3,47	
8	1500	280	3,47	

Контроль результатов коррозионных испытаний также осуществлялся визуально, а именно с поверхности образцов аккуратно были убраны продукты коррозии и измерена площадь коррозионного поражения основного металла. Результаты представлены в табл. 5.

Таблица 5. Результаты коррозионного испытания

№ п/п	Скорость движения сопла, мм/мин	Температура, °C	Rz, мкм	Процент повреждённой поверхности, %
1	750	440	3,47	0
2	1500	440	3,47	0
3	750	440	7,17	0
4	1500	440	7,17	0
5	750	280	7,17	0
6	1500	280	7,17	8,40
7	750	280	3,47	0,90
8	1500	280	3,47	1,25

Из 16 образцов, помещённых в камеру соляного тумана, подверглись коррозии только 3. По данным из табл. 5 можно сказать, что прокорродировали образцы, нанесённые при меньшей температуре. Образцы с меньшей шероховатостью корродировали чаще, но процент повреждённой площади у них меньше, чем у образца с большей шероховатостью. Также можно сказать, что

большая скорость нанесения приводит к большей вероятности коррозии.

В итоге, можно сказать, что лучший режим для предотвращения коррозии основного металла – это большая температура и шероховатость, низкая скорость нанесения.

Заключение. По результатам проведённого исследования выяснилось, что при варьировании параметров нанесения, а именно скорости движения сопла, температура воздуха в сопле и шероховатости поверхности подложки, проявляются закономерности в сочетании параметров нанесения для получения требуемых свойств. Так, при необходимости высокой прочности сцепления, надо будет увеличить шероховатость, но уменьшить скорость движения сопла и температуру воздуха. Если требуется повышенная устойчивость покрытия к деформации, то режим должен быть следующим: низкая температура и высокая скорость нанесения и шероховатость. Для увеличения коррозионной стойкости необходимо увеличить температуру и шероховатость, но снизить скорость нанесения.

Литература

- Любимов Б.В. Защитные покрытия изделий / Ленинград : Машиностроение, 1969. 216 с.
- Солнцев С.С. Защитные технологические покрытия и тугоплавкие эмали. М. : ЛЕНАНД, 2016. 304 с. ISBN 978-5-9710-3620-3.
- Алхимов А.П., Клинов С.В., Косарев В.Ф., Фомин В.М. Холодное газодинамическое напыление. Теория и практика. М. : Физматлит, 2010. 536 с.
- Алхимов А.П., Гулидов А.И., Косарев В.Ф., Нестерович Н.И. Особенности деформирования микрочастиц при ударе о твёрдую преграду // Прикладная механика и техническая физика. 2000. Т. 41. № 1. С. 204–209.
- Assadi H., Gartner F., Stoltenhoff T., Kreye H. Bonding mechanism in cold gas spraying // Acta Materialia. 2003. Vol. 51. No. 15. P. 4379–4394.
- Ghelichi R., Bagherifard S., Guagliano M., Verani M. Numerical simulation of cold spray coating // Surface and Coatings Technology. 2011. Vol. 205. P. 5294–5301.
- King P., Bae G., Zahiri S. et al. An experimental and finite element study of cold spray copper impact onto two aluminium substrates // Journal of Thermal Spray Technology. 2010. Vol. 19. No. 3. P. 620–634.
- Aborkin A. и др. 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. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), 2023. Т. 7, № 6.
- Reshetniak V. и др. Effect of the Interface on the Compressibility of Substances with Spherical Nano-Inhomogeneities on the Example of Al/C60 // Nanomaterials. MDPI, 2022. Т. 12, № 12.
- King P., Vucko M., Poole A. et al. Cold spray antifouling of marine seismic streamers, CSIRO Wealth From Oceans Flagship. URL: <https://publications.csiro.au/rpr/download?pid=csiro:EP124574&dsid=DS1> (дата обращения: 07.03.2020).
- Katanoda H., Fukuhara M., Iino N. Numerical study of combination parameters for particle impact velocity and temperature in cold spray // Journal of Thermal Spray Technology. 2007. Vol. 16. No. 5–6. P. 627–633. DOI: 10.1007/s11666-007-9087-7.
- Champagne V., Helfrich D. The unique abilities of cold spray deposition // International Materials Reviews. 2016. Vol. 61 (7). P. 437–455. DOI: 10.1080/09506608.2016.1194948.
- De Force B., Eden T., Potter J. Cold spray Al-5 % Mg coatings for the corrosion protection of magnesium alloys // Journal of Thermal Spray Technology. 2011. Vol. 20. No. 6. P. 1352–1358.
- Li C.-J., Yang G.-J., Gao P.-H. et al. Characterization of nanostructured WC-codeposited by cold spraying // Journal of Thermal Spray Technology. 2007. Vol. 16. No. 5–6. P. 1011–1020.
- Koh P.K., Cheang P., Loke K. et al. Deposition of amorphous aluminium powder using cold spray // Thermal Spray 2012: Proceedings from the International Thermal Spray Conference and Exposition. Houston, 2012. P. 22–24.

References

- Lyubimov B.V. Protective coatings of products / B.V. Lyubimov. Leningrad Mashinostroenie, 1969. 216 p.
- Solntsev, S.S. Protective technological coatings and refractory enamels / S.S. Solntsev. Moscow: LENAND, 2016. 304 p. ISBN 978-5-9710-3620-3.
- Alkhimov A.P., Klinkov S.V., Kosarev V.F., Fomin V.M. Cold Gas-Dynamic Spraying. Theory and Practice. Moscow: Fizmatlit, 2010. 536 p.
- Alkhimov A.P., Gulidov A.I., Kosarev V.F., Nesterovich N.I. Features of deformation of microparticles during impact with a solid obstacle // Applied Mechanics and Technical Physics. 2000. Vol. 41. No. 1. Pp. 204–209.
- Assadi H., Gartner F., Stoltenhoff T., Kreye H. Bonding mechanism in cold gas spraying // Acta Materialia. 2003. Vol. 51. No. 15. P. 4379–4394.
- Ghelichi R., Bagherifard S., Guagliano M., Verani M. Numerical simulation of cold spray coating // Surface and Coatings Technology. 2011. Vol. 205. P. 5294–5301.
- King P., Bae G., Zahiri S. et al. An experimental and finite element study of cold spray copper impact onto two aluminium substrates // Journal of Thermal Spray Technology. 2010. Vol. 19. No. 3. P. 620–634.
- Aborkin A. и др. 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. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), 2023. Т. 7, № 6.
9. Reshetniak V. и др. Effect of the Interface on the Compressibility of Substances with Spherical Nano-Inhomogeneities on the Example of Al/C60 // *Nanomaterials*. MDPI, 2022. Т. 12, № 12.
 10. King P., Vucko M., Poole A. et al. Cold spray antifouling of marine seismic streamers, CSIRO Wealth From Oceans Flagship. URL: <https://publications.csiro.au/rpr/download?pid=csiro:EP124574&dsid=DS1> (дата обращения: 07.03.2020).
 11. Katanoda H., Fukuhara M., Iino N. Numerical study of combination parameters for particle impact velocity and temperature in cold spray // *Journal of Thermal Spray Technology*. 2007. Vol. 16. No. 5–6. P. 627–633. DOI: 10.1007/s11666-007-9087-7.
 12. Champagne V., Helfrich D. The unique abilities of cold spray deposition // *International Materials Reviews*. 2016. Vol. 61 (7). P. 437–455. DOI: 10.1080/09506608.2016.1194948.
 13. De Force B., Eden T., Potter J. Cold spray Al-5 % Mg coatings for the corrosion protection of magnesium alloys // *Journal of Thermal Spray Technology*. 2011. Vol. 20. No. 6. P. 1352–1358.
 14. Li C.-J., Yang G.-J., Gao P.-H. et al. Characterization of nanostructured WC-codeposited by cold spraying // *Journal of Thermal Spray Technology*. 2007. Vol. 16. No. 5–6. P. 1011–1020.
 15. Koh P.K., Cheang P., Loke K. et al. Deposition of amorphous aluminium powder using cold spray // *Thermal Spray 2012: Proceedings from the International Thermal Spray Conference and Exposition*. Houston, 2012. P. 22–24.