

**УДК 691.75****ОБЗОР ТЕХНОЛОГИИ ХОЛОДНОГО ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО  
НАПЫЛЕНИЯ, КАК СПОСОБА ЗАЩИТЫ СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ ОТ  
КОРРОЗИИ****Калинин Кирилл Романович,**

аспирант

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего  
образования «Российский университет транспорта»; 101475, Россия, г. Москва, ул.

Образцова, д. 9, стр. 9

E-mail: sml\_lt@mail.ru

**Аннотация**

Рассмотрены вопросы коррозионного разрушения стальных изделий и обоснована актуальность антикоррозионной защиты в условиях воздействия атмосферной среды. Выполнен анализ технологии холодного газодинамического напыления (ХГДН) и её применения для повышения коррозионной стойкости стальных конструкций. На основе литературного обзора показано отличие метода ХГДН от газотермических методов, а также выделены основные параметры процесса, определяющие структуру покрытия: его плотность, пористость, адгезию и механические характеристики. Отдельно рассмотрено применение порошка из цинка при ХГДН, как эффективного материала для антикоррозионной защиты стальных изделий.

**Ключевые слова:** атмосферная коррозия, антикоррозионная защита, стальные конструкции, напыление, холодное газодинамическое напыление (ХГДН), cold spray, порошковые материалы, алюминий, цинк, цинковое покрытие, коррозионная стойкость, протекторная защита.

**AN OVERVIEW OF COLD GAS DYNAMIC SPRAYING TECHNOLOGY AS A  
METHOD FOR PROTECTING STEEL PRODUCTS FROM CORROSION****Kalinin Kirill Romanovich,**

Ph.D. student

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Russian University of  
Transport", 101475, Russia, Moscow

E-mail: sml\_lt@mail.ru

**ABSTRACT**

The issues of corrosion damage to steel products are examined, and the relevance of anti-corrosion protection under the influence of the atmospheric environment is substantiated. An analysis has been carried out of the cold gas dynamic spraying (CGDS) technology and its

application for increasing the corrosion resistance of steel structures. Based on a literature review, the difference between the CGDS method and gas thermal methods is demonstrated, and the main process parameters that determine the coating structure are identified: its density, porosity, adhesion, and mechanical characteristics. The use of zinc powder in CGDS as an effective material for the anti-corrosion protection of steel products is considered separately.

**Keywords:** Cold gas dynamic spraying; metal structures; friction joints; pre-treatment; zinc-filled compositions; flame spraying; corrosion resistance; zinc; friction coefficient.

### Введение

Защита стальных конструкций от коррозионного разрушения по сей день является важной задачей. Эксплуатируемые конструкции в разных сферах строительства и машиностроения попадают в коррозионную среду как низкой, так и высокой агрессивности. Это обуславливает дополнительные исследования, направленные на поддержание эксплуатируемых и изготавливаемых конструкций в рабочем состоянии.

В условиях сухой атмосферы происходит химическое взаимодействие металла с кислородом и другими газообразными компонентами воздуха, называемое сухой коррозией. Данная электрохимическая атмосферная коррозия является наиболее распространенным видом коррозионного разрушения металлов – на ее долю приходится около 80% общих потерь. Как правило, сухая коррозия приводит лишь к потускнению металла и не вызывает его разрушения, но при определенной влажности в атмосфере сухая коррозия переходит во влажную. Величина влажности воздуха, при которой образуется адсорбционная пленка влаги и атмосферная коррозия переходит во влажную, составляет 70-80% для чистой поверхности металла и 50-60% для поверхности загрязненной пылью или продуктами коррозии [1].

Целью работы является рассмотрение технологии холодного газодинамического напыления (ХГДН) как метода формирования антикоррозионных покрытий на стальных изделиях. В ходе обзора анализируются механизм формирования покрытий и особенности коррозионного поведения цинковых покрытий, нанесенных методом ХГДН.

### Способ защиты от коррозии

Для обеспечения антикоррозионной защиты стальных изделий в мировой практике активно используется нанесение специальных металлоподобных покрытий с твердой структурой. В производственной индустрии одним из распространённых методов нанесения покрытий является напыление в твердофазном состоянии.

В 1980-х группой ученых ИТПМ СО РАН было проведено исследование обтекания тел сверхзвуковым двухфазным потоком «воздух + твердые частицы», в процессе которого было отмечено образование слоя из металлических частиц на лобовой поверхности тела в условиях «холодного» обтекания, т. е. при температуре торможения газа около 300 К [2]. Отсутствие высоких температур, характерных для газотермических методов позволило сделать вывод о реализации нового метода нанесения покрытия, который был назван холодным газодинамическим напылением (ХГДН). Формирование покрытия методом ХГДН осуществляется в результате предварительного ускорения напыляемых частиц до сверхзвуковой скорости и их соударения о подложку с последующей деформацией.

В 1994 г. в США был получен патент, позволяющий напылять разнообразные материалы – металлы, сплавы, полимеры и их смеси [3]. Основной целью данных исследований являлось напыление покрытий с необходимым уровнем свойств (снижение пористости, повышение твердости, прочности и коррозионной стойкости). Данную задачу решали введение в поток газа порошков металла размером от 1 до 50 мкм и плотностью от

0,05 до 17 г/(с\*см<sup>2</sup>). Скорость газового потока находилась в пределах от 300 до 1200 м/с. При столкновении напыляемых частиц с поверхностью изделия происходило их пластическая деформация и образование прочных адгезионных связей с подложкой, а применение мелкодисперсных порошков способствовало уменьшению объема микрополостей и созданию более однородной структуры с повышенной коррозионной стойкостью, твердостью и адгезией.

Данное открытие показало, что наличие высоких температур в струе не является обязательным условием формирования покрытий. На рисунке 1 представлена диаграмма сравнения основных параметров двухфазного потока ХГДН покрытия с параметрами, присущими традиционным методам напыления [4].

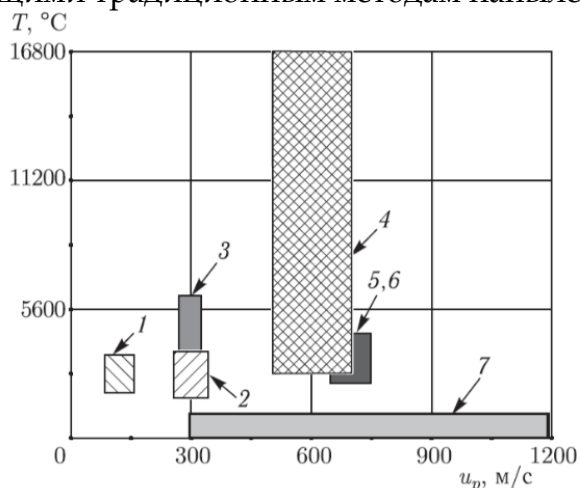


Рисунок 1 – Диаграмма значений температуры  $T$  и скоростей частиц  $u_p$  при различных методах напыления. 1 – низкоскоростной газопламенный метод, 2 – высокоскоростной газопламенный метод, 3 – электродуговой метод, 4 – плазменный метод, 5 и 6 – детонационный и высокоскоростной жидкотопливный метод, 7 – холодный газодинамический метод [3]

Формирование покрытий без расплавления частиц, отсутствие окисления, пористости и температурных деформаций является основным преимуществом процесса ХГДН в сравнении с другими методами газотермического напыления.

Холодное газодинамическое напыление является общим названием процесса. Можно встретить такие названия, как кинетическая металлизация, динамическая металлизация, газокинетическое напыление и холодное напыление (Cold Spray).

#### Механизм формирования ХГДН покрытий

Формирование покрытия условно включает в себя несколько стадий. Первая стадия – это разгон и нагрев частиц (возможен предварительный нагрев частиц). Вторая стадия – активация поверхности и запуск эрозионно-упрочняющего воздействия. Третья стадия – взаимодействие частиц с поверхностью подложки и формирования адгезионного контакта. Четвертая стадия – закрепление частиц за счет последующих ударов и наращивание покрытия необходимой толщины. Процессе ударного взаимодействия сопровождается локальным кратковременным повышением температуры в зоне контакта частица-подложка, не приводящие к общему расплавлению слоя.

Исследования [5] показали, что обязательным условием для формирования покрытия является скорость взаимодействия (соударения) частиц с подложкой. Для частиц размером  $d_p \leq 50$  мкм существуют критические скорости взаимодействия их с подложкой ( $u_p = 500-600$  м/с). Если скорость частиц при соударении с подложкой меньше критической, то наблюдается классический процесс эрозии или слабая фиксация частиц. При превышении

критической скорости - процесс эрозии переходит в процесс напыления и реализуется устойчивое формирование покрытия (рост адгезионного слоя), при этом свойства покрытия, такие как адгезия, пористость, твердость и др., существенно зависят от скорости частиц.

Необходимо отметить, что порошок для нанесения ХГДН покрытий, в основном, состоит из частиц различной дисперсности и массы, поэтому не все частицы ускоряются до критических скоростей, при которых происходит их взаимодействие с поверхностью изделия (подложки) и формирование покрытия. Крупные частицы часто не достигают критической скорости и при сближении с подложкой отскакивают от нее.

#### Микроструктура ХГДН покрытий

Согласно проведенным исследованиям в работе [6] на рисунке 2 представлены микрофотографии поверхности образца и его поперечного шлифа, сформированного при напылении алюминиевых частиц размером от 20 до 40 мкм с применением частиц корунда ( $Al_2O_3$ ).

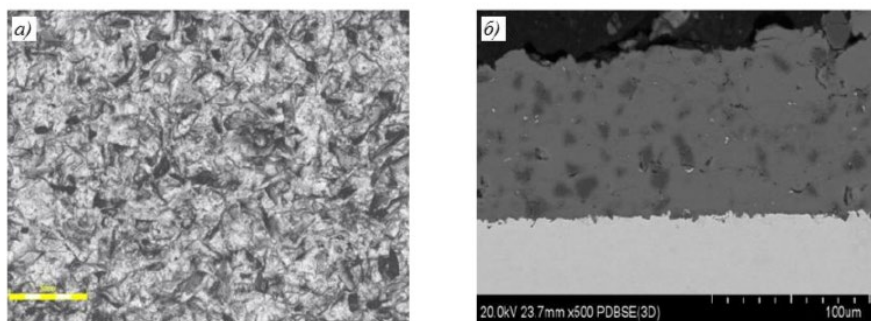


Рисунок 2 – Микрофотографии внешнего слоя на поверхности образца (а) и поперечного шлифа покрытия из (б), сформированного при напылении алюминиевых частиц [6]

На поверхности (а) наблюдается развитая шероховатость вследствие применения частиц корунда в составе напыляемого материала для получения плотного сцепления частиц алюминия между собой. На поперечном шлифе (б) сквозная пористость отсутствует – покрытие однородно по всей толщине слоя и имеет прочное сцепление с материалом подложки.

В работе [7] большое внимание уделяется коэффициенту напыления  $k_d$ , который определяется отношением прироста массы образца (масса покрытия) к массе использованного для получения данного покрытия порошка. На рисунке 3 (а) и (б) представлены микроснимки поперечных шлифов алюминиевого покрытия, нанесенного в режимах напыления  $k_d \ll 1$  и  $k_d \approx 1$  соответственно. При напылении в режиме малых (а) коэффициентов напыления покрытие имеет чешуйчатую структуру с плотной упаковкой без заметных пор, а в режиме больших (б) коэффициентов напыления – степень упаковки частиц ниже, а закрытая пористость выше.

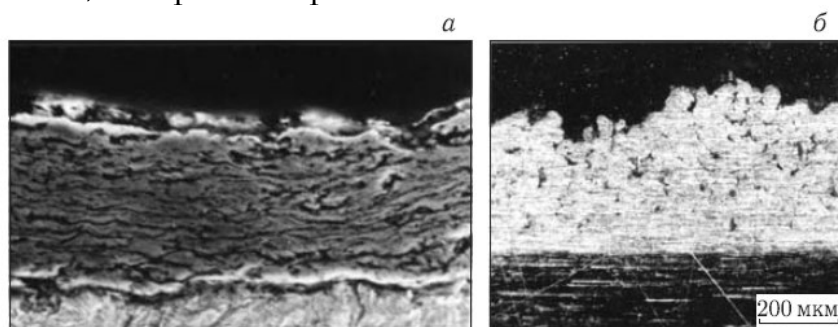


Рисунок 3 – Фотографии поперечных шлифов алюминиевого покрытия, нанесенного в режиме малых (а) и больших (б) коэффициентов напыления  $kd$  [7]

Анализ результатов по исследованию структуры алюминиевых покрытий показал, что напыление в режиме малых  $kd$  приводит к более высокой степени деформаций частиц, их плотной упаковке и к малому значению пористости, чем в режиме больших  $kd$ .

В работе [8] было рассмотрено титановое покрытие, нанесенное с помощью метода ХГДН. Анализ показал, что покрытие, полученное при более высокой температуре газа, получается более плотным, а шероховатость за счет лучшей деформируемости частиц – меньшей.

В работе [9] автором был выполнен анализ влияния температуры и давления воздуха, а также дистанции напыления на скорость и температуру частиц алюминиевого порошка с частицами сферической формы диаметром  $d_p$  22 мкм. Увеличение температуры газа и, как следствие, скорость частиц приводило к увеличению эффективности напыления (коэффициента напыления  $kd$ ), а увеличение дистанции уменьшало скорость частиц и приводило снижению эффективности напыления. Изменение давления оказывало наименьшее влияние по сравнению с температурой и дистанцией напыления.

При аналитическом моделировании процесса образования покрытия в работе [10] результаты также показали, что увеличение давления и скорости газа приводит к увеличению скорости частиц и улучшению адгезии покрытия, а угол и дистанция напыления влияют на равномерность нанесения покрытия.

По результатам выше представленных работ установлено, что микроструктура ХГДН покрытия определяется главным образом выбранным режимом нанесения и параметрами частиц покрытия. Для получения хороших свойств (высокая адгезия с подложкой, однородное строение, плотная упаковка частиц и низкая пористость) предпочтительны режимы, обеспечивающие достаточную скорость и деформирование частиц, и оптимальные параметры газа и дистанции напыления. Необходимо отметить, что не существует единого режима нанесения покрытий. Его параметры зависят от материала покрытия и требуемых конечных свойств.

Свойства материала, размер и морфология частиц

Согласно процессу формирования ХГДН покрытий, явление пластической деформации частиц при ударе и образование тонкого слоя покрытия являются основными причинами формирования покрытия. Важнейшими свойствами материала, рассматриваемого для напыления, являются – его предел прочности, теплоемкость и температура плавления. В зависимости от этого каждый материал имеет определенный диапазон скоростей, в котором процесс эрозии переходит в процесс напыления. В научном сообществе существует ряд работ, посвященных критической скорости, в которых предлагаются формулы для ее расчета в зависимости от материалов, их свойств и параметров напыления.

Процесс деформации частиц определяется мобильностью дислокаций кристаллической решетки и их взаимодействием [11]. Кристаллическая структура и тип связи, структура и размер зерна, инородные атомы и фазы определяют сопротивление деформации, и, соответственно, металлы с одной кристаллической структурой и типом связи имеют одинаковый механизм деформаций.

Металлы с ГЦК-решеткой (медь, алюминий, серебро, золото, платина, никель и гамма-железо) имеют большое число плоскостей скольжения, что определяет их высокую пластичность. Металлы гексагональной структуры (цинк, кадмий, кобальт, магний, титан) имеют значительно меньше скользящих поверхностей, что приводит к уменьшению

пластичности. ОЦК-металлы (вольфрам, тантал, молибден, ниобий, ванадий, хром, альфа-железо) имеют самую низкую пластичность их трех типов. А вот группы тетрагональных или тригональных кристаллических систем включают оксиды, которые, в основном, не пригодны для ХГДН из-за их низкой пластичности.

В работе [12] сделан вывод, что методом ХГДН легко напылять металлы с гексагональной структурой и низкой температурой плавления, но кроме прочностных характеристик материала следует принимать возможность практического достижения требуемой скорости и температуры удара частиц. Следовательно, цинк, алюминий и медь являются наиболее подходящими материалами для ХГДН, так как имеют низкий предел прочности и разупрочняются с ростом температуры.

В работе [13] на основе аналитического моделирования теплопроводности были получены минимальные размеры частиц различных материалов, меньше которых распространение тепла происходит достаточно медленно, чтобы на поверхности соударяющихся частиц происходил локализованный неустойчивый сдвиг, который рассматривается как минимальное требование к формированию покрытия. На рисунке 4 представлены минимальные диаметры частиц различных материалов. Это означает, что частицы меньшего диаметра не достигнут состояния, при котором произойдет сцепление.

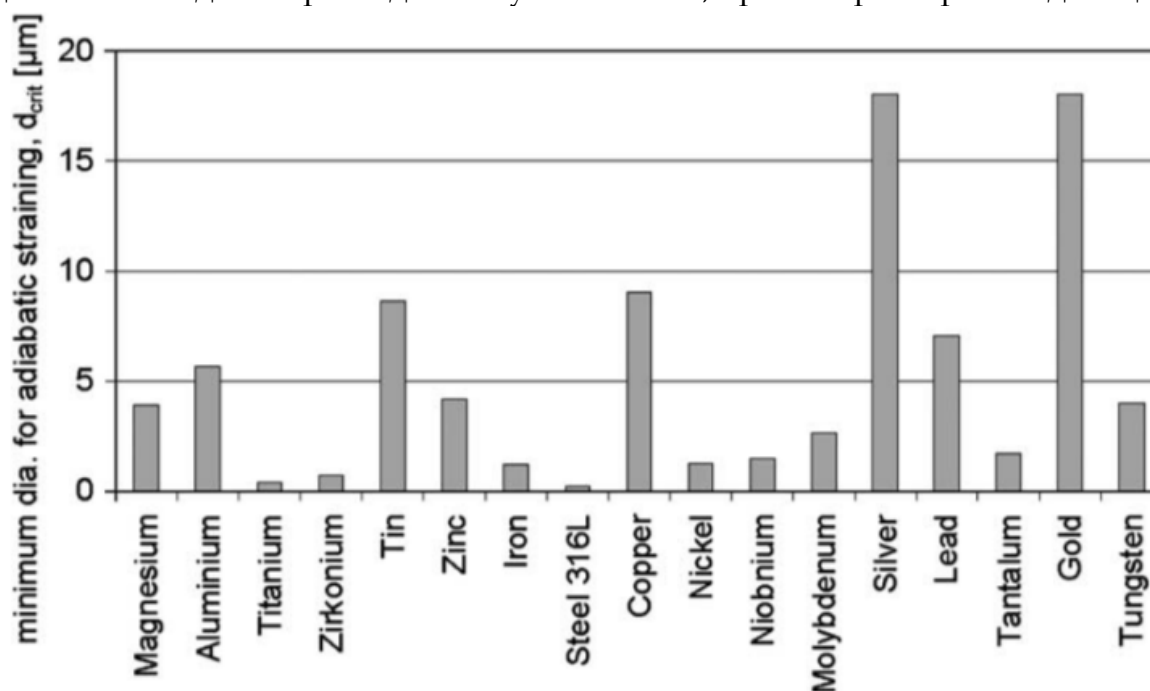


Рисунок 4 – Минимальный диаметр частиц для локализованного адиабатического сдвига при ударе для разных материалов [13]

Исследования подтвердили, что плотность, размер и морфология частиц влияют на ее скорость, а частицы из материалов с более высокой плотностью при тех же параметрах приобретают меньшую скорость. Более мелкие частицы проще ускоряются, но также легко замедляются и увлекаются потоком, не достигая подложки. Температура частицы при контакте с подложкой обратно пропорциональна объему частицы, успевающему прогреться за время удара, и от размера частиц значительно зависит их способность приобретать температуру перед соударением. Из этого следует, что мелкодисперсные частицы имеют более высокую критическую скорость.

#### Применение частиц цинка

Цинк защищает сталь как механически, ограничивая от доступа окружающей среды, так и электрохимически в местах повреждения покрытий и в порах при формировании

гальванопары Zn - Fe. На цинке (аноде) протекает окислительная реакция в которой цинк растворяется (ионизируется), превращается в гидроксид и затем в карбонат цинка. На стали (катоде) протекает сопряженная реакция восстановления кислорода до гидроксид-иона OH. Таким образом, цинк как более электроотрицательный металл, выполняет функцию анодного покрытия, а сталь при этом находится под катодной защитой и не корродирует до тех пор, пока в процессе участвует цинк.

При нанесении покрытий из чистого цинка размером менее 48 мкм с помощью азота в работе [14] результаты показали образование аморфной фазы на границе между частицами цинка в локальной контактной зоне с подложкой из нержавеющей стали, которую связывают с локальным тепловым воздействием и последующим быстрым затвердеванием материала. Подобные результаты были получены в работе [15], где на границе раздела между цинком и подложкой из сплава магния AZ91 были обнаружены механические сплавы и фазы, которые указывают на кратковременное плавление в зоне интенсивного механического взаимодействия. Авторами был сделан вывод, что механическое сплавобразование в зоне перемешивания материалов и металлургические реакции в окрестностях этих зон отвечают за прочную адгезию покрытия к подложке.

В работе [16] было исследовано явление общей коррозии образцов из стали Ст.2 с алюминиевым, цинковым и алюмоцинковым покрытиями с размерами частиц 1-50 мкм ( $d_{ср} \approx 10$  мкм). Перед напылением пластины из стали Ст.2 обезжиривали и подвергали предварительной иглофрезерной обработке. Напыление производилось при постоянном давлении в форкамере 1,5 МПа и одинаковой температуре подогрева газа 100 °С с дистанцией напыления 15 мм. Для испытаний на коррозионную стойкость был выбран метод ускоренных испытаний на общую коррозию по ГОСТ 9.017: полное погружение образцов в 3-% раствор хлористого натрия с добавлением 0,1 %-го раствора H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (данный состав имитирует условия морской среды).

Наблюдение за алюминиевым покрытием показало, что активная коррозия подложки имеет место только в начале электрохимического взаимодействия, в результате которого появляются практически нерастворимые продукты коррозии, что закупоривает поры и делает покрытие не проницаемым.

Характер коррозии цинкового покрытия показал, что каждая частица, имеющая доступ к воздушной атмосфере покрывается пленкой оксида цинка ZnO. В отличие от оксидов железа, она весьма тонка и обладает высокой прочностью соединения с основным металлом, что служит надежным (в сравнении с оксидами железа) барьером от коррозии. Но когда пленка становится толстой или наряду с оксидами возникают сульфиды, нитриды, хлориды и другие соли – она теряет свои защитные свойства, становится пористой и рыхлой и на ней появляются трещины. Также большую роль играют открытые поровые каналы. Цинк в этом случае выполняет функции протекторной защиты, возникновения гальванопары ускоряет его разрушение – цинк активно растворяясь, защищает поверхность изделия.

По результатам исследования можно сделать вывод, что алюминиевое и алюмоцинковые покрытия с 5% и 10% Zn надёжнее всего защищают основной металл в агрессивных средах. В свою очередь, цинковое и алюмоцинковое покрытие с 20% Zn в таких средах растворяются достаточно интенсивно, но играют роль протекторной защиты.

В работе [17] исследуется образование покрытий из алюминия, цинка, а также их смесей на подложках из стали ДН-36. При напылении данных покрытий азотом пористость оказалась в пределах 0,5-3%, а при напылении гелием – 0,5-1%. Определение адгезии покрытий не определило существенных зависимостей от параметров напыления. На всех протестированных покрытиях адгезия оказалась на уровне от 6,89 до 13,78 МПа, а в случае напыления чистого алюминия с помощью гелия она оказалась несколько ниже – 2,445 МПа.

Особенное внимание в работе было уделено коррозионной стойкости покрытий для защиты судов, и отмечается, что все варианты покрытия предотвращают коррозию стали, особенно выделяется покрытие их смеси  $Zn+15\text{ Al}$ . Подобный вывод также был сделан в работе [16].

В работе [18] отмечено, что скорость коррозии цинкового покрытия толщиной 250 мкм у образцов из стали 20 после 2016 ч испытаний в 3% растворе хлористого натрия составила  $0,63 \cdot 10^{-15}$  кг/(м<sup>2</sup>\*год). У образцов из низкоуглеродистой стали 08Ю с покрытием цинка, нанесенного методом горячего цинкования той же толщины, скорость коррозии в той же среде оказалась выше –  $1,0 \cdot 10^{-15}$  кг/(м<sup>2</sup>\*год). Авторами был сделан вывод, что нанесение покрытие из цинка на сталь методом ХГДН на сталь 20 позволяет снизить скорость коррозии низкоуглеродистой стали более чем в 40 раз. Также отмечено, что высокая твердость цинкового покрытия (около 600 МПа) предполагает высокую способность поверхности сопротивляться разрушению в условиях коррозионно-абразивной среды.

Таким образом, формирования цинкового покрытия сопровождается локальным подплавлением частиц и образованием аморфной фазы между подложкой и покрытием, которые способствуют формированию прочной адгезии покрытия с подложкой. Эта особенность обусловлена процессом высокоскоростного контактного взаимодействия частиц цинка с подложкой, что приводит к реализации фазовых превращений.

С точки зрения коррозионной стойкости установлено, что в агрессивных средах цинковое покрытие разрушается более интенсивно, чем алюминиевое или алюмоцинковые покрытия, однако оно сохраняет протекторный характер защиты и позволяют значительно снизить скорость коррозии по сравнению с горячим цинкованием, а отмеченная высокая твердость повышает его устойчивость к повреждениям механического характера.

### Заключение

Холодное газодинамическое напыление (ХГДН) рассматривается как эффективный метод получения металлических покрытий, основанный на твердофазном формировании и позволяющий получать покрытия со свойствами, недоступными для традиционных методов газотермического напыления. Ключевыми условиями образования ХГДН покрытия являются разгон частиц до сверхзвуковых скоростей, ударное взаимодействие с поверхностью металла и последующая пластическая деформация частиц. Если скорость столкновения частиц превышает критическую, то это вызывает значительную пластическую деформацию и приводит к образованию адгезионных связей и наращиванию слоев покрытия. Необходимо отметить, что микроструктура и свойства покрытия (адгезия, когезия, пористость и твердость) определяются режимами напыления (параметры газа и дистанцией), а также дисперсностью и морфологией порошковых частиц.

Помимо свойств покрытий, получаемых методом ХГДН, стоит отметить ряд технологических преимуществ данного метода. Напыление может выполняться при различных климатических условиях, включая изменения температуры, давления и влажность. Кроме того, существуют, как стационарные, так и переносные типы оборудования, что обеспечивает возможность проведения работ непосредственно на месте эксплуатации и нанесения покрытия на локальные участки.

Поэтому целесообразно рассмотреть использование метода ХГДН для напыления покрытий из цинка, т.к. цинк выступает доступным материалом, обеспечивающий механическую и протекторную электрохимическую защиту в местах нарушения сплошности, а ХГДН позволяет формировать покрытие с технологическими условиями, пригодными для практического нанесения.

## Список литературы:

1. Гоматин Н.А. Физико-химическое основы коррозии цинковых покрытий / Гоматин Н.А. // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2019. – № 4-2. – С. 32-35.
2. Алхимов А.П., Косарев В.Ф. Папырин А.Н. Метод «холодного» газодинамического напыления // ДАН СССР. – 1990 – Т.315 – С. 1062-1065.
3. Gas dynamic spraying method for applying a coating: pat. US5302414A; filed 19.05.90; publ. 12.04.94.
4. Kempton, K. Where Thermal Spray Coatings Are Most Cost Effective // Welding Journal. – 1991. – V. 70, № 8. – pp. 41-50. DOI 10.1300/J443v66n11\_07.
5. Алхимов А. П., Косарев В. Ф., Папырин А. Н. Газодинамическое напыление. Экспериментальное исследование процесса напыления // ПМТФ. – 1997. – Т. 38, № 2. – С. 176-183.
6. Tapphorn R., Hennes J., Gabel H. Direct write of antenna aperstructures and electronic intercon-nects using kinetic metallization // Proceedings of the International Thermal Spray Conference. Las Vegas, – 2009. – pp. 589-595. DOI 10.31399/asm.cp.itsc2009p0589.
7. Алхимов А.П., Клинков С.В., Косарев В.Ф., Фомин В.М. Холодное газодинамическое напыление : Теория и практика // ООО Издательская фирма "Физико-математическая литература". – 2010. – 536 с. – С. 386-388.
8. Козлов И.А., Лещев К.А., Никифоров А.А., Демин С.А. Холодное газодинамическое напыление покрытий (обзор) // Труды ВИАМ. – 2020. – № 8(90). – С. 77-93.
9. Шоринов А.В., Маркович С.Е. Управление эффективностью процесса холодного напыления защитно-восстановительных покрытий на магниевые сплавы // Авиационно-космическая техника и технология. – 2018. – № 8(152). – С. 66-72.
10. Матвиенко С.А., Стрельник Ю. Н., Савенко Э.С. Аналитическая модель процесса образования покрытия методом холодного газодинамического напыления // Современные проблемы теории машин. – 2025. – № 19. – С. 135-139.
11. Prasad, Y. V. Hot working guide. A compendium of processing maps / Y. V. Prasad, S. Sasidhara // ASM International, Materials Park, OH, USA - 1997. – pp. 1-24. URL <https://books.google.ru/books?id=orphpC0hEYoC&printsec=frontcover&hl=ru#v=onepage&q&f=false>.
12. Vlcek, J. A systematic approach to material eligibility for the Cold Spray process / J. Vlcek, L. Gimeno, H. Huber, E. Lugscheider // Thermal Spray 2003 Advancing the Science and Applying the Technology. – 2003. – pp. 37-44. DOI 10.1361/10599630522738.
13. Schmidt, T. Development of a generalized parameter window for cold spray deposition / T. Schmidt, F. Gartner, H. Assadi, H. Kreye // Acta Materialia. – 2005. – № 3(54) – pp. 77-93. DOI: 10.1016/j.actamat.2005.10.005.
14. Li, C. J. Impact fusion phenomenon during Cold Spraying of zinc / Ch. J. Li, W. Y. Li, H. Fukunuma // Thermal Spray Solutions. Advances in Technology and Application / Verband F'ur Schweißen and verwandte Verfahren DVS-Verlag GmbH, Dusseldorf, Germany. – 2004. – pp. 335-340. DOI 10.31399/asm.cp.itsc2004p0335.
15. Wielage, B. High resolution microstructural investigations of interfaces between light weight alloy substrates and cold sprayed coatings / B. Wielage, H. Podlesak, T. Grund, A.

Wank // Proc. Of Thermal spray conf. Thermal spray connects: Explore its surfacing potential! Basel, Swizerland. – 2005. – pp. 154-158. DOI 10.31399/asm.cp.itsc2005p0154.

16. Тушинский Л.И., Алхимов А.П., Косарев В.Ф., Плохов А.В., Мочалин Н.С. Исследование общей коррозии металлических покрытий, нанесенных методом холодного газодинамического напыления (ХГН) // Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты. – 2006. – С. 23-25.
17. Blose, R. E. Metal passivation to resist corrosion using the cold spary process / R. E. Blose, D. Vasquez, W. Kratochvil // Proc. Of Thermal spray conf. Thermal spray connects: Explore its surfacing potential. Basel, Swizerland. – 2005. – pp. 126-135. DOI 10.1615/ProcThermalSprConf.ThermalSprConnects.126.
18. Архипов В.Е., Дубравина А.А., Лондарский А.Ф., Москвитин Г.В., Пугачев М.С., Хрущев М.М. Коррозионные свойства покрытий, нанесенных газодинамическим напылением // Коррозия: материалы, защита. – 2014. – № 4 – С. 33-38.

### References:

1. Gomatin N.A. Physico-chemical fundamentals of corrosion of zinc coatings / Gomatin N.A. // International Journal of Humanities and Natural Sciences, – 2019. – № 4-2. – pp. 32-35.
2. Alkhimov A.P., Kosarev V.F. Papyrin A.N. Method of "cold" gas dynamic spraying // DAN USSR. – 1990 – V.315 – pp. 1062-1065.
3. Gas dynamic spraying method for applying a coating: pat. US5302414A; filed 19.05.90; publ. 12.04.94.
4. Kempton K. Where Thermal Spray Coatings Are Most Cost Effective // Welding Journal. – 1991. – V. 70, № 8. – pp. 41-50. DOI 10.1300/J443v66n11\_07.
5. Alkhimov A. P., Kosarev V. F., Papyrin A. N. Gas-dynamic spraying. Experimental study of the spraying process // PMTF. – 1997. – V. 38, № 2. – pp. 176-183.
6. Tapphorn R., Henness J., Gabel H. Direct write of antenna aperstructures and electronic interconnects using kinetic metallization // Proceedings of the International Thermal Spray Conference. Las Vegas, – 2009. – pp. 589-595. DOI 10.31399/asm.cp.itsc2009p0589.
7. Alkhimov A.P., Klinkov S.V., Kosarev V.F., Fomin V.M. Cold gas dynamic spraying: Theory and practice // LLC Publishing Firm "Physical and Mathematical Literature". – 2010. – pp. 386-388.
8. Kozlov I.A., Leshchev K.A., Nikiforov A.A., Demin S.A. Cold gas dynamic coating (review) // Proceedings of VIAM. – 2020. – № 8(90). – pp. 77-93.
9. Shorinov A.V., Markovich S.E. Efficiency management of the process of cold spraying of protective and reducing coatings on magnesium alloys // Aerospace engineering and Technology. – 2018. – №. 8(152). – pp. 66-72.
10. Matvienko S.A., Strelnik Yu.N., Savenko E.S. Analytical model of the coating formation process using the cold gas dynamic spraying method // Modern problems of machine theory. – 2025. – №. 19. – pp. 135-139.
11. Prasad, Y. V. Hot working guide. A compendium of processingmaps / Y. V. Prasad, S. Sasidhara // ASM International, Materials Park, OH, USA – 1997. – pp. 1-24. URL <https://books.google.ru/books?id=orphpC0hEYoC&printsec=frontcover&hl=ru#v=onepage&q&f=false>.

12. Vlcek, J. A systematic approach to material eligibility for the Cold Spray process / J. Vlcek, L. Gimeno, H. Huber, E. Lugscheider // Thermal Spray 2003 Advancing the Science and Applying the Technology. – 2003. – pp. 37-44. DOI 10.1361/10599630522738.
13. Schmidt, T. Development of a generalized parameter window for cold spray deposition / T. Schmidt, F. Gartner, H. Assadi, H. Kreye // Acta Materialia. – 2005. – № 3(54) – pp. 77-93. DOI: 10.1016/j.actamat.2005.10.005.
14. Li, C. J. Impact fusion phenomenon during Cold Spraying of zinc / Ch. J. Li, W. Y. Li, H. Fukunuma // Thermal Spray Solutions. Advances in Technology and Application / Verband F"ur Schweißen and verwandte Verfahren DVS-Verlag GmbH, Dusseldorf, Germany. – 2004. – pp. 335-340. DOI 10.31399/asm.cp.itsc2004p0335.
15. Wielage, B. High resolution microstructural investigations of interfaces between light weight alloy substrates and cold sprayed coatings / B. Wielage, H. Podlesak, T. Grund, A. Wank // Proc. Of Thermal spray conf. Thermal spray connects: Explore its surfacing potential! Basel, Switzerland. – 2005. – pp. 154-158. DOI 10.31399/asm.cp.itsc2005p0154.
16. Tushinsky L.I., Alkhimov A.P., Kosarev V.F., Plokhov A.V., Mochalin N.S. Study of general corrosion of metal coatings applied using the cold gas dynamic spraying (CGDS) method // Metalworking: technology, equipment, tools. – 2006. – pp. 23-25.
17. Blose, R. E. Metal passivation to resist corrosion using the cold spray process / R. E. Blose, D. Vasquez, W. Kratochvil // Proc. Of Thermal spray conf. Thermal spray connects: Explore its surfacing potential. Basel, Switzerland. – 2005. – pp. 126-135. DOI 10.1615/ProcThermalSprConf.ThermalSprConnects.126.
18. Arkhipov V.E., Dubrovina A.A., Londarsky A.F., Moskvitin G.V., Pugachev M.S., Khrushchev M.M. Corrosion properties of coatings applied by gas-dynamic spraying // Corrosion: materials, protection. – 2014. – № 4 – pp. 33-38.