

ОБЗОР ХОЛОДНОГО ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ: ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Волков А. О.¹,

¹Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ»

Аннотация. Проведен анализ современного состояния вопроса в области напыления защитных и восстановительных покрытий методом холодного газодинамического напыления (ХГН) и перспектив его дальнейшего развития, который показал, что развитие холодного напыления требует проведения исследований по дополнительному воздействию на температурно-скоростные характеристики частиц напыляемого материала из источников помимо газодинамического процесса.

Ключевые слова: холодное газодинамическое напыление, покрытие, подложка, свойства покрытий, эффективность.

Введение

Явление формирования покрытия ХГН впервые было обнаружено в Институте теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук (ИТПМ СО РАН) в начале 80-х годов прошлого века при изучении обтекания затупленных тел сверхзвуковым двухфазным потоком (газ плюс твердые частицы) [1]. Метод ХГН продолжает исследоваться и развиваться как перспективная аддитивная технология в аэрокосмической, автомобильной и многих других отраслях промышленности.

Анализ публикаций

За последние десятилетия технология ХГН подвергалась разностороннему исследованию. Большинство работ посвящены вопросам возможности напыления разнообразных порошков и их смесей для получения требуемого покрытия, опираясь на исследования манипуляциями давлением и температурой газа-носителя или смесей газов [2–6], из которых наибольшее распространение получили воздух, азот, гелий и их смеси в разных пропорциях. Изучаются влияние на получаемые покрытия свойств материала напыляемого порошка и морфологии частиц напыляемого порошка либо порошковой смеси, а также свойства и морфология материала подложки [7–10]. Большое внимание уделяется рационализации геометрии соплового аппарата [11–13]. Также есть несколько исследований по внедрению вспомогательного оборудования, косвенно способствующего получению лучшего результата при нанесении покрытия [14–16].

Цель и постановка задачи

Таким образом, целью данной работы является анализ современного состояния вопроса в области напыления защитных и восстановительных покрытий методом холодного газодинамического напыления и перспективы его дальнейшего развития.

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить следующие задачи:

- всесторонний обзор особенностей процесса холодного газодинамического напыления;
- анализ возможностей дальнейшего развития технологии ХГН.

Особенности процесса ХГН

Метод ХГН основан на способности расширяемого в сопле Лавала газа-носителя передавать кинетическую энергию низкодисперсным твердым частицам порошка для достижения ими критической скорости, то есть скорости, при которой частицы при соударении с подложкой формируют устойчивую связь.

Для процесса ХГН рассматривают две основные теории формирования покрытия: диффузионную и металлургическую [17].

Для обеспечения сцепления при напылении используется комбинация кинетической и тепловой энергии, где тепловая энергия размягчает или плавит напыляемый материал, а кинетическая энергия уплотняет и упрочняет сцепление.

Следует также отметить, что технология ХГН имеет два подвида, отличительным признаком которых выступает диапазон рабочих давлений газа-носителя от 0,6 до 1,0 МПа и от 1,5 до 6,0 МПа, называемые «хо-

лодное газодинамическое напыление низкого давления» (ХГННД) и «холодное газодинамическое напыление высокого давления» (ХГНВД) соответственно.

ХГНВД, благодаря значительно большему запасу энергий для передачи напыляемому порошку, позволяет напылять более широкий диапазон материалов с высокими показателями эксплуатационных свойств, такими как микротвердость, адгезионная / когезионная прочность, пористость и т.д.

ХГННД, в свою очередь, имея более узкий диапазон применяемых материалов, имеет преимущества в мобильности, экологичности, низкой шумности, безопасности и низкой стоимости применяемого оборудования, низких затратах на расходные материалы, а также не требует высококвалифицированного персонала.

Важным аспектом целесообразности применения того или иного метода напыления выступает соотношение цены-качества получаемых покрытий. Как уже упоминалось ранее, метод ХГН основан на обеспечении частицам напыляемого порошка необходимых температурно-скоростных характеристик перед соударением с подложкой. При этом при использовании ХГНВД температурно-скоростные характеристики частиц напыляемого порошка могут быть увеличены незначительно в сравнении с достигаемыми при использовании ХГННД, но за счет значительно больших энергетических затрат и затрат на расходные материалы.

Для более полного понимания процесса рассмотрим основные элементы и параметры процесса ХГН, влияющие на достижение необходимых температурно-скоростных характеристик частиц напыляемого порошка.

Геометрия сопла

Соплом называют канал, в котором происходит ускорение газа за счет его расширения с падением давления. В простом сужающемся сопле возможно ускорение потока до значения, равного скорости звука. Так как процессу ХГН необходимы значения скорости, значительно превышающие скорость звука, для этой цели используются каналы, площадь сечения которых сначала уменьшается, а затем – увеличивается. Такие каналы называют соплами Лавалю.

Для получения оптимальной геометрии сопла Лавалю задаются определенными рабочими температурой и давлением газа, а также свойствами используемого газа-носителя.

Для достижения максимального эффекта использования сопла Лавалю его геометрические параметры изучались и неоднократно оптимизировались многими исследователями [2,11–13]. В работе [2] было проведено исследование по созданию сопла с полной длиной <70 мм, которое показало, что создание коротких сопел для работы в ограниченном пространстве возможно. Исследование [11] показало, что при использовании воздуха как газа-носителя существует ограничение числа Маха на выходе из сопла в диапазоне 1,5–3. Нижняя граница диапазона продиктована необходимостью избежать слишком высоких температур вблизи подложки, а верхняя – появлением ударной волны, существенно снижающей скорость частиц. В работе [12] было смоделировано сопло с оптимальной геометрией для нанесения мягких материалов (полимеров) методом ХГН. Для продления срока эксплуатации сопла было проведено исследование [13] по использованию водного охлаждения сопла, которое показало, что без существенного влияния на скорость частиц снижение температуры стенки сопла позволяет избежать прилипания частиц к стенкам сопла и препятствует его засорению.

Температура и давление газа-носителя

Температура и давление газа-носителя дают некоторую «гибкость» при использовании метода ХГН, то есть, манипулируя этими параметрами, возможно управлять процессом напыления и, соответственно, его результатами.

Как уже было сказано ранее, температура и давление газа-носителя тесно связаны с геометрией используемого сопла. Энергия газа-носителя, в зависимости от его температуры и давления, срабатывается в сопле, переходя в кинетическую энергию потока, то есть в его скорость. При статической геометрии сопла есть определенный диапазон температур и давления газа-носителя, при котором происходит полный переход энергии в кинетическую, то есть превышение этого диапазона бессмысленно, так как скорость потока расти не будет, но может привести к негативным результатам и ненужным затратам. Температура газа-носителя также частично вносит свой вклад в нагрев частиц напыляемого порошка и материала подложки, что необходимо учитывать при выборе рабочих параметров процесса.

Важно понимать, что при повышении рабочего давления газа-носителя скорость частиц возрастает не только за счет более высокой скорости газа, но и за счет увеличения его плотности, а значит, способности передачи газом своей кинетической энергии частицам [2]. Но, как было сказано выше, повышение давления может иметь и негативные эффекты. Основными ограничениями давления газа-носителя являются геометрия сопла и эксплуатационные затраты.

Ещё более многогранно влияние температуры газа-носителя. При повышении температуры газа скорость звука газа возрастает, а затем увеличивается общая скорость газа и, как следствие, скорость частиц [3, 18]. Более того, повышение температуры газа-носителя снижает критическую скорость частиц за счет их термического размягчения.

Температура газа-носителя значительно влияет на микроструктуру покрытия [4, 19, 20]. Как видно на рис. 1, покрытие, полученное при более высокой температуре газа-носителя, получается более плотным, а глубина шероховатости – меньшей, за счет лучшей деформируемости частиц.

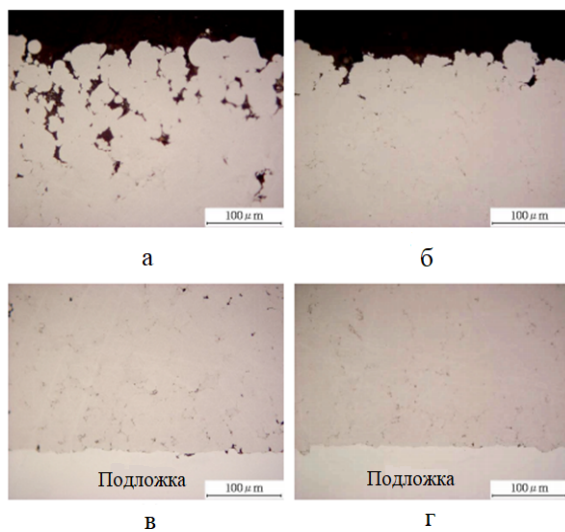


Рис. 1. Поперечные микрофотографии напылений Ti в условиях напыления при 500°C на левой стороне и при 830 °C с правой стороны с использованием газа-носителя N₂: а, б – верхний слой; в, г – слой, близкий к подложке [4]

Одним из важнейших свойств покрытия является прочность сцепления. Как показано на рис. 2, прочность сцепления увеличивается с повышением температуры газа-носителя. Большое влияние температура газа-носителя имеет на эффективность процесса

напыления, то есть на отношение количества закрепившихся частиц к напыляемому количеству частиц. Как показано на рис. 3, при напылении таких материалов как Cu, Al и Ni, повышение температуры газа-носителя на 150–200 °C повышает эффективность от 55 до 95 %. Но для таких материалов как Nb, Ti, CoNiCrAlY и нержавеющая сталь 316 повышение температуры газа-носителя имеет весьма ограниченный эффект.

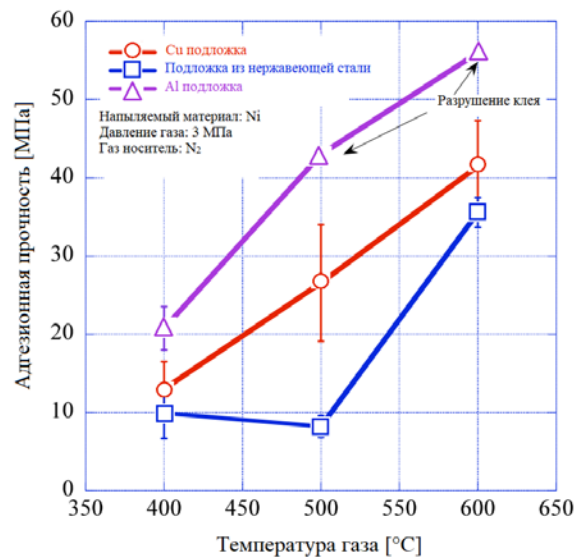


Рис. 2. Соотношение между температурой газа-носителя и прочностью сцепления Ni покрытий на трех разных подложках [4]

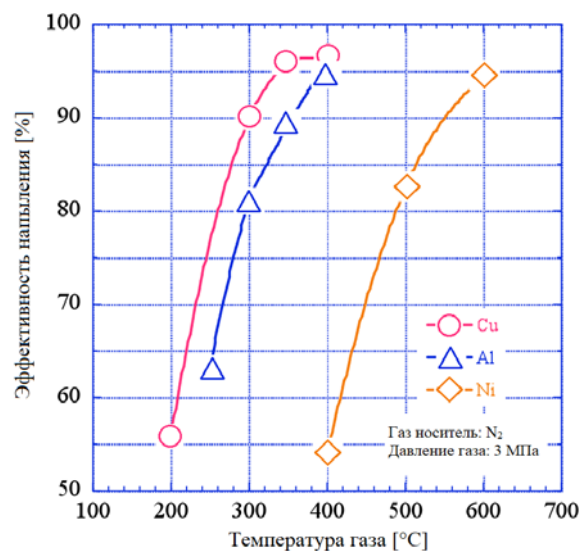


Рис. 3. Соотношение между эффективностью напыления и температурой газа-носителя для Cu, Al и Ni [4]

Как показано на рис. 4, эффективность напыления Ti достигла 90 % при 500 °C и не

увеличивалась при повышении температуры газа-носителя, а эффективность напыления CoNiCrAlY очень низкая даже при высокой относительно других материалов температуре в 850 °С.

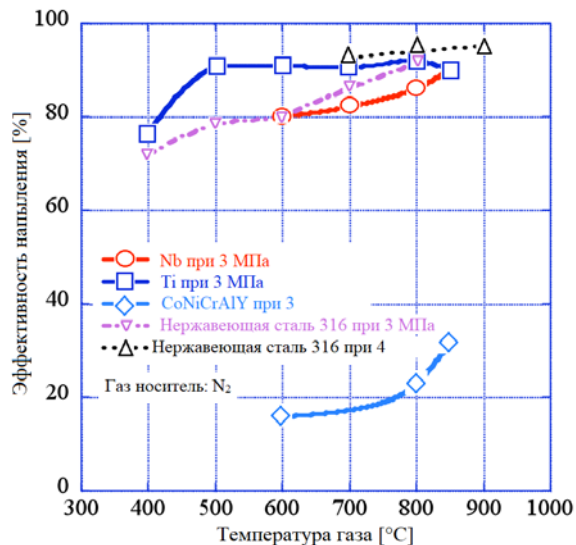


Рис. 4. Соотношение между эффективностью напыления металлов и температурой газа-носителя для Nb, Ti, CoNiCrAlY и нержавеющей стали 316 [4]

Итак, повышение температуры газа-носителя имеет значительное положительное влияние на свойства покрытий, получаемых методом ХГН. Использование конкретного эффективного диапазона температур газа-носителя ограничивается рядом возможных негативных факторов, основными из которых являются:

- негативное влияние на свойства материала напыляемых частиц при, повышенных, температурах газа-носителя и как следствие на свойства покрытия;
- негативное влияние на напыляемую поверхность при повышенных температурах газа-носителя;
- чувствительность материала напыляемых частиц к повышению температуры газа-носителя (эффективность напыления);
- чувствительность материала напыляемых частиц к составу используемого газа-носителя при повышенных температурах;
- прочностные характеристики соплового аппарата при повышенных температурах.

Используемый газ-носитель

Для метода ХГН широко используются три газа-носителя: воздух, азот, гелий и смеси воздуха с азотом и воздуха с гелием.

Воздух – самый дешевый и легкодоступный из газов-носителей; пневмомагистраль со сжатым воздухом широко используется многими предприятиями, что делает его фаворитом для использования в методе ХГН, но ввиду чувствительности некоторых материалов к наличествующему в воздухе кислороду и азоту, при определенных температурах, и изменения способности передачи кинетической энергии частицам напыляемого порошка, приводит к некоторым ограничениям на его использование.

Азот – более дорогой газ в сравнении с воздухом, с немного большей способностью передачи кинетической энергии частицам напыляемого порошка. Его широко применяют при напылении функциональных покрытий из материалов, чувствительных к кислороду.

Гелий имеет значительную стоимость в сравнении с предыдущими двумя газами, но его превосходная способность передачи кинетической энергии частицам напыляемого порошка и инертность к материалам частиц напыляемого порошка и подложки делает его универсальным газом-носителем для широкого спектра материалов и температур.

Скорость газа может быть вычислена из:

$$V = M \sqrt{\gamma RT}, \quad (1)$$

где M – число Маха; γ – показатель адиабаты; T – температура газа; R – удельная газовая постоянная.

Вышеприведенное уравнение показывает, почему гелий считается лучшим газом-носителем для ХГН. Он имеет меньшую молекулярную массу μ ($R = 8314/\mu$) и более высокий показатель адиабаты [5]. Показатели адиабаты воздуха, азота и гелия составляют 1,4, 1,4 и 1,66 соответственно, а удельные газовые постоянные для воздуха, азота и гелия составляют 287 Дж/кг·К, 296,8 Дж/кг·К и 2077 Дж/кг·К соответственно. Согласно приведенному выше уравнению: скорость азота будет ниже скорости гелия и, соответственно, скорость воздуха будет ниже, чем у азота и гелия, а при увеличении температуры газа – скорость газа возрастает. Впоследствии скорость частиц также возрастает. Сила лобового сопротивления частиц возрастает при увеличении давления газа, поскольку более высокое давление газа увеличивает плотность газа, как уже говорилось ранее.

В исследовании [6] было проведено сравнение азота и гелия в качестве газов-

носителей при условии одинаковой скорости частиц напыляемого материала. Было установлено, что при той же скорости частиц эффективность напыления и плотность покрытия зависели в основном от температуры частиц и подложки, а при условии использования более высокой температуры газа, покрытия, полученные с использованием азота как газа-носителя, имели более высокую эффективность напыления и большую плотность, чем при использовании гелия.

Свойства материала, размер и морфология напыляемых частиц

Свойства материала напыляемых частиц в значительной степени влияют на параметры процесса. Согласно основным теориям процесса напыления методом ХГН, явление обширной пластической деформации частиц при ударе и формирование тонкого слоя расплавленного материала толщиной $\delta < 0,015d$ (d – диаметр частицы) [1, 21, 22], в котором температура близка к температуре плавления материала частицы, являются основными причинами формирования покрытия. Очевидно, что важнейшими свойствами материала для напыления являются его предел прочности, теплоемкость и температура плавления. В зависимости от своих свойств, каждый материал имеет определенный диапазон скоростей, в котором процесс эрозии переходит в процесс напыления. Более низкая скорость, как и её превышение, приведут к эрозии. Метод ХГННД широко используется для напыления пластичных материалов, таких как Zn, Cu, Al, Ni, Pb, Sn, а также их смесей и сплавов; в свою очередь активно проводятся исследования по напылению полимерных, керамических, композитных и наноразмерных материалов.

Немаловажным фактором в процессе ХГН является размер частиц напыляемого материала. Так как ускорение частицы, базируясь на законе Ньютона, обратно пропорционально её размеру, более предпочтительными для использования являются мелкодисперсные частицы. Для ХГН широко используются частицы размером 5–100 мкм.

Многие исследования подтвердили, что плотность, размер и морфология частицы значительно влияют на её скорость [7–9, 24, 25]. Частицы из материалов с более высокой плотностью приобретают значительно меньшую скорость. Более мелкие частицы проще ускоряются, но слишком мелкодисперсные также легко замедляются и увлекаются потоком, не достигая подложки. Так как температура в контакте обратно пропорциональна объему частицы, успевающему заметно прогреться за время удара, от размера частиц значительно зависит их способность приобретать температуру перед соударением, что является важнейшим фактором. Соответственно более мелкодисперсные частицы имеют более высокую критическую скорость.

Ограничения по размеру частиц имеет место ввиду их слипания и уменьшения силы воздействия, действующей на частицу пропорционально коэффициенту аэродинамического сопротивления. В работе [23] были рассчитаны критические диаметры частиц (рис. 5), выше которых распространение тепла происходит достаточно медленно, чтобы на поверхности соударяющихся сферических частиц происходил локализованный неустойчивый сдвиг, который рассматривается как минимальное требование к формированию покрытия. Это означает, что более мелкие частицы не смогут достичь параметров, необходимых для сцепления.

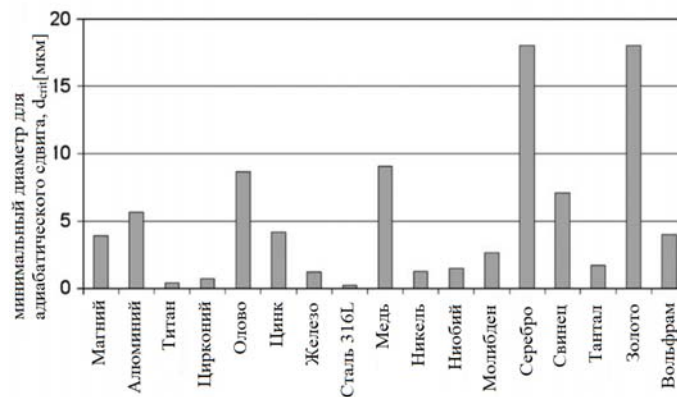


Рис. 5. Минимальные диаметры частиц для локализованного адиабатического сдвига при ударе, рассчитанные для разных материалов [23]

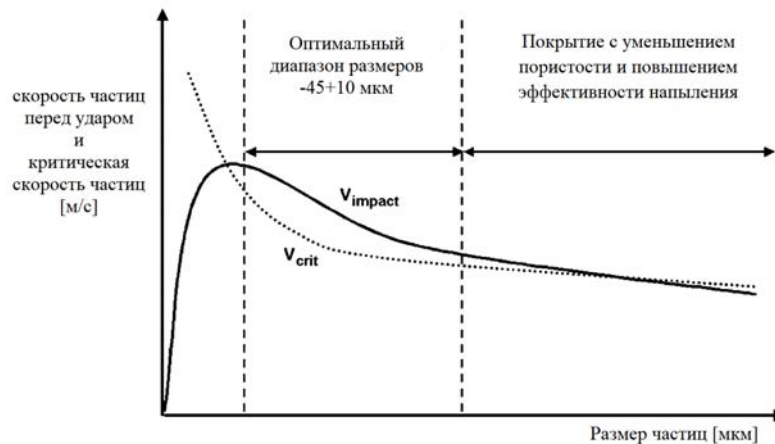


Рис. 6. Критическая скорость напыляемых частиц — v_{crit} и скорость напыляемых частиц перед ударом о подложку — v_{impact} в зависимости от размера частиц. Оптимальное распределение размеров частиц для ХГН [23]

Также в [23] был проведен анализ оптимальных размеров частиц (рис. 6), согласно которому для большинства материалов оптимальный размер частиц лежит в диапазоне, где скорость соударения частицы значительно выше, чем критическая скорость частицы. Слева от этого диапазона — напыление не происходит, а справа — покрытия имеют высокую пористость и низкую эффективность напыления.

Сравнение скорости частиц с разной морфологией [9] показало, что при одинаковых условиях частицы с неравномерной формой имеют больший коэффициент лобового сопротивления и, как следствие, приобретают большее ускорение, чем частицы сферической формы.

Так же, говоря о влиянии размера частиц, важно понимать, что частицы порошка, используемые для напыления, зачастую имеют широкий диапазон распределения по размерам и, как следствие, чем диапазон шире, тем труднее правильно подобрать оптимальные режимы напыления [10].

Критическая концентрация

Свой вклад в эффективность напыления вносит концентрация частиц в потоке. В работе [1] проводились исследования коэффициента напыления (k_d) при условии, что скорость частицы практически не зависела от их концентрации. Была рассмотрена зависимость k_d при значениях критической концентрации $Q_1 = 1,0-2,0$ г/(см²·с) с использованием разных материалов преграды (рис. 7).

Была отмечена тенденция к увеличению, k_d для образцов из более твердых материалов

при этом имеющих более низкую теплопроводность.

Данный эффект объясняется нагревом поверхности подложки и частиц за счет перехода кинетической энергии в тепловую при соударении, а также влияния взаимодействия частиц, то есть дополнительного удара летящей следом частицы.

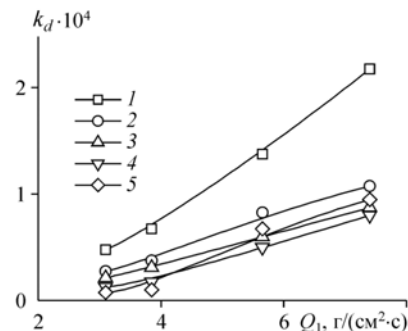


Рис. 7. Зависимость коэффициента напыления от удельного расхода частиц на подложках из: 1 — стали Х18Н9Т; 2 — стали Ст. 35; 3 — бериллиевой бронзы Бр. Б; 4 — латуни ЛС59; 5 — латуни Л 62 [1]

Такое взаимодействие частиц называют двойным ударом; он приводит к большей степени деформации, и также последующая частица препятствует отрыву предшествующей, что повышает вероятность напыления.

Угол напыления

Весьма важным также является угол напыления, то есть угол между подложкой и напыляемыми частицами. При соударении частиц под углом, отличным от нормали, скорость соударения частиц может быть раз-

ложена на нормальную и тангенциальную составляющие по отношению к подложке, как показано на рис. 8.

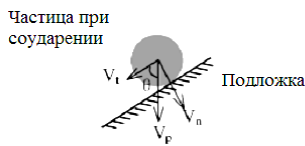


Рис. 8. Разложение скорости столкновения частиц под углом напыления θ [26]

Нормальная (V_n) и тангенциальная (V_t) скорости могут быть выражены как:

$$V_n = V_p \sin \theta, \quad (2)$$

$$V_t = V_p \cos \theta, \quad (3)$$

где V_p – скорость соударения частиц; θ – угол напыления между осью сопла и поверхностью подложки; V_n уменьшается с уменьшением θ от 90° до нуля.

В работах [1, 26] получены результаты для различных углов напыления, согласно которым оптимальный диапазон напыления лежит в пределах $80\text{--}90^\circ$ для пластичных материалов, таких как медь, и немного шире $70\text{--}90^\circ$ для менее пластичных, таких как титан. Это объясняется значительным увеличением коэффициента эрозии C_0 для углов $40\text{--}70^\circ$ [27], уменьшением нормальной составляющей скорости соударения частицы с подложкой и наличием сильного вращающего момента при контакте частиц с подложкой.

На рис. 9 и 10 [26] показано влияние угла напыления на относительную эффективность напыления меди и титана соответственно.

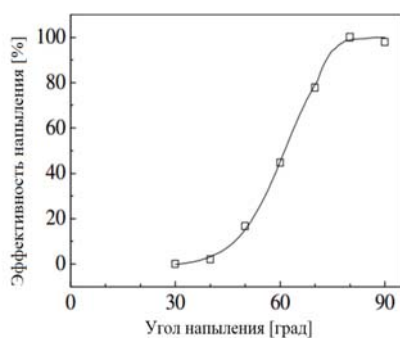


Рис. 9. Влияние угла напыления на относительную эффективность напыления меди (15–37 мкм) [26]

Как говорилось ранее, на подложку напыляются только частицы, имеющие скорость выше критической скорости при нормальном

ударе. При уменьшении угла напыления нормальная составляющая скорости также будет уменьшаться, а когда ее значение станет меньше критической скорости, частица не будет напыляться на подложку.

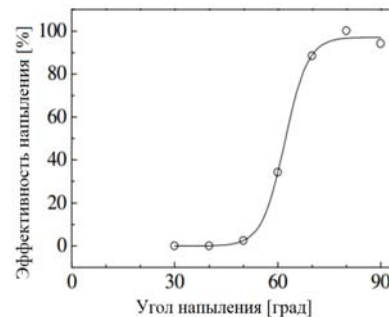


Рис. 10. Влияние угла напыления на относительную эффективность напыления титана (37–44 мкм) [26]

Что касается зависимости относительной эффективности напыления от угла напыления, угол напыления можно разделить на три угла: диапазон углов максимального напыления, диапазон углов переходного процесса и диапазон углов без напыления (рис. 11)



Рис. 11. Общая схема зависимости относительной эффективности напыления от угла напыления [26]

Кроме того, более широкий диапазон распределения размера частиц порошка приводит к большему распределению скоростей, которое будет влиять на диапазон углов максимального осаждения и переходного процесса, что можно наблюдать на рис. 9 и 10. Частицы титана имеют больший диапазон максимального напыления и меньший диапазон переходного процесса из-за их более узкого диапазона распределения по размеру по сравнению с медными частицами [26]. Угол напыления также влияет на микроструктуру покрытия, поскольку направление деформации частиц в покрытии изменяется в соот-

ветствии с углом напыления. Так в работе [1] отмечено, что косой удар при углах напыления $< 90^\circ$ может привести к улучшению свойств покрытия ввиду дополнительного скольжения в контакте в момент соударения и более полного проявления эффекта разрушения оксидных слоев. Стоит также отметить, что в таком случае происходит селекция частиц, при которой частицы со слабой связью отрываются и уносятся потоком, а покрытие формируют лишь прочно закрепившиеся частицы.

Шероховатость поверхности

Считается, что шероховатость поверхности влияет на эффективность напыления только для первых нескольких слоев частиц, напыляемых на подложку. Таким образом, становится важным определение начального связующего механизма на границе раздела подложка / покрытие.

Одна из предложенных теорий механизма сцепления покрытий, полученных методом холодного напыления, связана с механическим сцеплением частиц напыляемого порошка с поверхностью подложки [1]. Таким образом, можно предположить, что повышенная шероховатость поверхности подложки еще больше повысит сцепление, поскольку она представляет собой массив с большим количеством углов и углублений, в которые могут быть помещены напыляемые частицы. Эти частицы затем подвергаются дополнительному уплотнению, когда на подложку воздействуют последующие частицы. Это явление иллюстрируется на рис. 12.

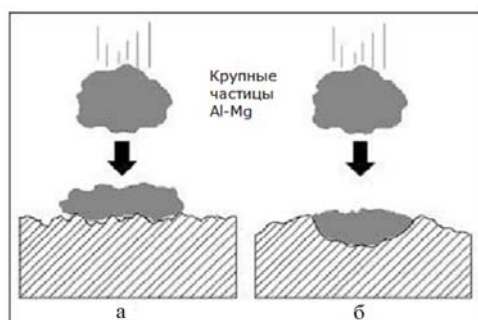


Рис. 12. Схематическое изображение больших частиц Al-Mg, падающих на поверхность подложки с (а) низкой шероховатостью поверхности и (б) высокой шероховатостью поверхности [28]

Для поверхностей с низкой шероховатостью первые частицы, подвергающиеся соударению, имеют небольшую площадь по-

верхности, с которой они могут сцепляться, что приводит к более слабым связям. Эти частицы имеют меньшую вероятность войти в сцепление с подложкой, что приводит к первоначальному уменьшению эффективности напыления.

Другие авторы [29] сообщают, что для подложки с шероховатостью $Ra \approx 2,6$ мкм прочность сцепления выше, чем для отпескоструенной подложки с шероховатостью $Ra \approx 3,5$ мкм, составляющие соответственно 37 и 32 МПа. Это может быть связано с упрочнением, полученным во время пескоструйной обработки поверхности подложки, что затрудняет сцепление покрытия с подложкой.

Возможные пути развития холодного напыления

Анализируя взаимодействия элементов и параметров процесса ХГН, рассмотренных выше, можно сделать вывод, что большинство исследований по рационализации процесса ХГН направлены на изучение прямых и косвенных путей воздействия на критическую скорость частиц напыляемого материала и, как следствие, управление свойствами получаемых покрытий.

Стоит отметить, что часть исследований, посвященных воздействию на температурно-скоростные характеристики частиц напыляемого порошка, совместно с газодинамическим процессом, незначительна.

Имеются сведения об исследованиях электростатического воздействия на наноразмерные частицы напыляемого порошка [14, 15], а также получения покрытия с совмещением холодного газодинамического напыления с лазерными технологиями [16].

Электростатическое ускорение, безусловно, способно расширить диапазон размеров частиц, используемых для напыления, до наноразмеров, что может привести к получению покрытий с совершенно новыми эксплуатационными свойствами. Но необходимо расширить эти исследования для возможности использования частиц микроразмерного диапазона, которые широко используются и коммерчески доступны.

Что касается лазерного воздействия [30], то его применение крайне ограничено ввиду его негативного теплового воздействия, что нивелирует преимущества ХГН.

Таким образом, проанализировав особенности процесса ХГН, нужно отметить, что для расширения возможностей метода ХГН,

а также улучшения результатов его использования есть необходимость исследования возможностей гибридизации его с другими методами воздействия на частицы напыляемого порошка. В первую очередь следует рассмотреть возможности дополнительного влияния на скорость частицы напыляемого порошка, так как воздействие на температуру напыляемых частиц ограничено свойствами материала частиц.

Выводы

Всесторонний обзор ХГН показал, что за последние четыре десятилетия десятками научных групп были исследованы различные возможности использования метода, рационализация параметров процесса и оборудования. Все проведенные исследования прямо или косвенно были направлены на изменение температурно-скоростных характеристик частиц напыляемого порошка для попадания в диапазон критических скоростей напыляемого материала.

Отмечена необходимость модернизации существующего оборудования и недостаточное количество исследований по гибридизации метода холодного напыления и/или воздействия на температурно-скоростные характеристики частиц напыляемого материала сторонними (не газодинамическими) процессами.

Ограниченность воздействия на температуру подложки и частиц напыляемого материала приводит к необходимости повышения скорости соударения частиц напыляемого порошка с подложкой. Стороннее воздействие на скорость частиц напыляемого порошка позволит не только уменьшить температурное влияние и, как следствие, возможные негативные эффекты, но и значительно сократить энергетические и материальные расходы процесса, за счет отказа от дорогостоящего оборудования высокого давления, а также повысить эффективность процесса при работе с низким давлением.

Литература

1. Алхимов А.П., Клинков С. В., Косарев В. Ф., Фомин В. М. Холодное газодинамическое напыление. Теория и практика. Москва: Физматлит, 2010. 536 с.
2. Li W. Y., Li W. Y. Optimal Design of a Novel Cold Spray Gun Nozzle at a Limited Space. *J. Thermal Spray Technol.*, 2005. Vol 14 (3), pp. 391–396.
3. Li W. Y., Liao H., Wang H. T., Li C. J., Zhang G., Coddet C. Optimal design of a convergent-barrel

- cold spray nozzle by numerical method. *Applied Surface Science*, 2006. Vol 253, Issue 15, pp. 708–713.
4. Fukanuma H., Huang N. R. Development of High Temperature Gas Heater in the Cold Spray Coating System. *Proceedings of the International Thermal Spray Conference*. 2009, Seattle, Washington, USA, pp. 267–272.
5. Zahiri S. H., Yang W., Jahedi M. Characterization of cold spray titanium supersonic jet. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2009. pp. 110–117.
6. Wong W., Irissou E., Ryabinin. A. N., Legoux J. G. Influence of helium and nitrogen gases on the properties of cold gas dynamic sprayed pure titanium coatings. *J. Therm. Spray Technol.*, 2011. Vol 20 (1-2), pp. 213–226.
7. Клинков С. В., Косарев В. Ф., Сова Н. С., Ряшин А. А. Нанесение субмикроструктурированных покрытий методом ХГН. *XXIII семинар по струйным, отрывным и нестационарным течениям (с международным участием): сборник трудов*. Томск, 2012. С. 187–189.
8. Raja jayasingh T., Raja jeyaseelan T., Kannan C., Ganesh M. Numerical (CFD) Analysis of Thermal Spray Coating Process. *Karthikeyan International Journal of Modern Engineering Research*, 2014. Vol 4 (3), pp 46–62.
9. Fuknuma H., Ohno N., Son B., Huang R. The Influence of particle Morphology on In-Fright Particle Velocity in Cold Spray. *Plasma Giken Co., LTD*, Toda City, Saitama, Japan, 2006.
10. Champagne V. K. The Repair of Magnesium Rotorcraft Components by Cold Spray. *ASME*, 2008, pp. 164–175.
11. Jodoin B. Cold Spray Nozzle Mach Number Limitation. *J. Thermal Spray Technol.*, 2002. Vol 11, pp. 496–507.
12. Alhulaifi A. Numerical and Experimental Investigation of Cold Spray Gas Dynamics Effects for Polymer Coating. *MS/ME Thesis Defense*, South Dakota School of Mines & Technology, 2008. 42 p.
13. Fukanuma H., Huang R. Simulation of Cold Spray Nozzle Accompanying a Water-cooling Adjustment. *Plasma Giken Co.*, Saitama, Japan, 2011.
14. Jen T. C., Pan L., Li L., Chen Q., Cui W. The acceleration of charged nano-particles in gas stream of supersonic de-Laval-type nozzle coupled with static electric field. *Applied Thermal Engineering*, 2006. Vol 26, Issues 5–6. pp 613–621.
15. Takana H., Ogawa K., Shoji T., Nishiyama H. Computational simulation of cold spray process assisted by electrostatic force. *Powder Technology*, 2008. Vol 185, Issues 2. pp 116–123.
16. Кузнецов П.А. Аддитивные технологии в машиностроении, 2015. URL: <https://docplayer.ru/51171950-Prometey-kuznecov-pavel-alekseevich.html> (дата обращения: 15.03.2018).

17. Van Steenkiste T. H., Smith J. R., Teets R. E. Kinetic Spray Coatings. *Surface and Coatings Technology*, 1999. Vol 111, pp. 62–71.
18. Добротворський С. С., Гнучіх С. С., Добровольська Л. Г. Моделювання процесу високошвидкісного зіткнення дисперсних композитів зі сферичним тілом. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні*. 2016. № 33 (1205). С. 24–28.
19. Prisco U. Size-Dependent Distributions of Particle Velocity and Temperature at Impact in the Cold-Gas Dynamic-Spray Process. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015. Vol. 216. pp. 302–314.
20. 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. 66–73.
21. Cold Spraying: A Materials Perspective / H. Assadi et al. *Acta Materialia*, 2016. Vol. 116. pp. 382–407.
22. Kay C. M., Karthikeyan J. High Pressure Cold Spray – Principles and Applications. *Novelty: ASM International*, 2016. 338 p.
23. Schmidt T., Gartner F., Assadi H., Kreye H. Development of a generalized parameter window for cold spray deposition. *Helmut Schmidt University, University of the Federal Armed Forces Hamburg, Holstenhofweg 85, D-22043 Hamburg, Germany*, 2005.
24. Champagne V., Helfritsch D. The Unique Abilities of Cold Spray Deposition. *International Materials Reviews*, 2016. Vol. 61, iss. 7. pp. 437–455.
25. Клинков С.В., Косарев В.Ф., Желнина А.С. Нанесение методом холодного газодинамического напыления композиционных (металл – металл) покрытий. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Сер. Аэрокосмическая техника*. 2016. №47. С. 135–153.
26. LI C. J. Effect of Spray Angle on Deposition Characteristics in Cold Spraying. *ITSC 2003 Advancing the Science & Applying the Technology*, Ohio, USA, 2003, pp. 91–96.
27. Эванс А., Рафф А, Видерхорн С. Механизмы эрозии металлов при ударном взаимодействии частиц пыли. *ТОИП*, 1970. №3.
28. Van Steenkiste T. H., Smith J. R., Teets R. E. Aluminium coatings via kinetic spray with relatively large powder particles. *Surface and Coatings Technology*, 2002. Vol 154, pp. 237–252.
29. Price T. S., Shipway P. H., McCartney D. G. Effect of Cold Spray Deposition of a Titanium Coating on Fatigue Behavior of a Titanium Alloy. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2006. Vol 15, pp. 507–512.
30. Villafuerte J. Modern Cold Spray: Materials, Process, and Applications. *Switzerland: Springer*, 2015. 435 p.

References

1. Alhimov A.P., Klinkov S. V., Kosarev V. F., Fomin V. M. (2010) *Holodnoe gazodinamicheskoe napylenie. Teorija i praktika* (Gas dynamic cold spray. Theory and practice). Moscow, Fizmatlit, 2010. [In Russian].
2. Li W. Y., Li W. Y. Optimal Design of a Novel Cold Spray Gun Nozzle at a Limited Space. *J. Thermal Spray Technol.*, 2005. 14(3), 391–396.
3. Li W.Y., Liao H., Wang H.T., Li C.J., Zhang G., Coddet C. Optimal design of a convergent-barrel cold spray nozzle by numerical method. *Applied Surface Science*, 2006. 253 (15), 708–713.
4. Fukanuma H., Huang N. R. Development of High Temperature Gas Heater in the Cold Spray Coating System. *Proceedings of the International Thermal Spray Conference*. 2009, Seattle, Washington, USA, 267–272.
5. Zahiri S. H., Yang W., Jahedi M. Characterization of cold spray titanium supersonic jet. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2009. 110–117.
6. Wong W., Irissou E., Ryabinin. A.N., Legoux J.G. Influence of helium and nitrogen gases on the properties of cold gas dynamic sprayed pure titanium coatings. *J. Therm. Spray Technol*, 2011. 20 (1-2), 213–226.
7. Klinkov S. V., Kosarev V. F., Sova N. C., Rjashin A. A. (2012) Nanosenie submikrostrukturirovannyh pokrytij metodom HGN [Application of submicrostructured coatings using the CS method]. *XXIII seminar po strujnym, otrivnym i nestacionarnym techenijam (s mezhdunarodnym uchastiem): sbornik trudov* [proc.:seminar on jet, separated and non-stationary flows (with international participation)]. Tomsk, 2012, 187-189. [In Russian].
8. Raja jayasingh T., Raja jeyaseelan T., Kannan C., Ganesh M. Numerical (CFD) Analysis of Thermal Spray Coating Process. *Karthikeyan International Journal of Modern Engineering Research*, 2014. 4 (3), 46–62.
9. Fuknuma H., Ohno N., Son B., Huang R. The Influence of particle Morphology on In-Fright Particle Velocity in Cold Spray. *Plasma Giken Co., LTD*, Toda City, Saitama, Japan, 2006.
10. Champagne V. K. The Repair of Magnesium Rotorcraft Components by Cold Spray. *ASME*, 2008, 164–175.
11. Jodoin B. Cold Spray Nozzle Mach Number Limitation. *J. Thermal Spray Technol.*, 2002. 11, 496–507.
12. Alhulaifi A. Numerical and Experimental Investigation of Cold Spray Gas Dynamics Effects for Polymer Coating. *MS/ME Thesis Defense*, South Dakota School of Mines & Technology, 2008.
13. Fukanuma H., Huang R. Simulation of Cold Spray Nozzle Accompanying a Water-cooling Adjustment. *Plasma Giken Co., Saitama, Japan*, 2011.
14. Jen T. C., Pan L., Li L., Chen Q., Cui W. The acceleration of charged nano-particles in gas stream of supersonic de-Laval-type nozzle cou-

- pled with static electric field. *Applied Thermal Engineering*, 2006. 26, 5–6. 613–621.
15. Takana H., Ogawa K., Shoji T., Nishiyama H. Computational simulation of cold spray process assisted by electrostatic force. *Powder Technology*, 2008. Vol 185, 2. 116–123.
 16. Kuznecov, P.A. (2015) Additivnye tehnologii v mashinostroenii. [Additive technologies in mechanical engineering] Retrived from: <https://docplayer.ru/51171950-Prometey-kuznecov-pavel-alekseevich.html> (accessed: 15.03.2018) [In Russian].
 17. Van Steenkiste T H., Smith J. R., Teets R. E. Kinetic Spray Coatings. *Surface and Coatings Technology*, 1999. 111, 62–71.
 18. Dobrotvors'kij S. S., Gnuchih S. S., Dobrovols'ka L. G. Modeljuvannja procesu visokoshvidkисного zitknennja dispersnih kompozitiv zi sferichnim tilom.[Simulation of the process of high-speed contact of dispersed composites with a spherical body] *Visnik NTU «HPI». Serija: Tehnologii v mashinobuduvanni*. 2016. no. 33 (1205). pp. 24–28. (In Ukrainian).
 19. Prisco U. Size-Dependent Distributions of Particle Velocity and Temperature at Impact in the Cold-Gas Dynamic-Spray Process. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015. Vol. 216. pp. 302–314.
 20. Shorinov A. V., Markovich S. E. Upravlenie jefektivnost'ju processa holodnogo napylenija zashhitno-vosstanovitel'nyh pokrytij na magnievyje splavy. [Cold spray deposition efficiency control of protective and restorative coatings on magnesium alloys] *Aviacionno-kosmicheskaja tehnika i tehnologija*. 2018. no. 8 (152). pp. 66–73. [In Russian].
 21. Cold Spraying: A Materials Perspective / H. Asadi et al. *Acta Materialia*, 2016. Vol. 116. pp. 382–407.
 22. Kay C. M., Karthikeyan J. High Pressure Cold Spray – Principles and Applications. *Novelty : ASM International*, 2016. 338 p.
 23. Schmidt T., Gartner F., Assadi H., Kreye H. Development of a generalized parameter window for cold spray deposition. *Helmut Schmidt University, University of the Federal Armed Forces Hamburg, Holstenhofweg 85, D-22043 Hamburg, Germany*, 2005.
 24. Champagne V., Helfritsch D. The Unique Abilities of Cold Spray Deposition. *International Materials Reviews*, 2016. Vol. 61, iss. 7. pp. 437–455.
 25. Klinkov S.V., Kosarev V.F., Zhelnina A.S. Nanesenie metodom holodnogo gazodinamicheskogo napylenija kompozicionnyh (metall – metall) pokrytij. [Application of composite (metal - metal) coatings by cold gas-dynamic spraying] *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politehnicheskogo universiteta. Ser. Ajerokosmicheskaja tehnika*. 2016. no. 47. pp. 135–153. [In Russian].
 26. LI C. J. Effect of Spray Angle on Deposition Characteristics in Cold Spraying. *ITSC 2003 Advancing the Science & Applying the Technology*, Ohio, USA, 2003, 91–96.
 27. Jevans A., Raff A, Viderhorn S. Mehanizmy jerozii metallov pri udarnom vzaimodejstvii chastic pyli.[Mechanisms of metal erosion during impact interaction of dust particles] *TOIR*, 1970. no. 3.
 28. Van Steenkiste T. H., Smith J. R., Teets R. E. Aluminium coatings via kinetic spray with relatively large powder particles. *Surface and Coatings Technology*, 2002. 154, 237–252.
 29. Price T. S., Shipway P. H., McCartney D. G. Effect of Cold Spray Deposition of a Titanium Coating on Fatigue Behavior of a Titanium Alloy. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2006. 15, 507–512.
 30. Villafuerte J. Modern Cold Spray: Materials, Process, and Applications. *Switzerland: Springer*, 2015. 435 p.

Волков Андрей Олегович¹, инженер кафедры технологии производства авиационных двигателей, тел. +380996641007, e-mail: a.volkov@khai.edu

¹Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», 61070, Украина, г. Харьков, ул. Чкалова, 17.

Огляд холодного газодинамічного напилювання: проблеми і перспективи

Анотація. З огляду на недостатність інформації про можливість впливу на кількісні та якісні показники утворюваних захисних та відновлювальних покриттів і вивчення властивостей таких покриттів був проведений аналіз сучасного стану питання в галузі холодного газодинамічного напилення низького тиску (ХГННТ) з можливістю подальшого використання накопиченого досвіду для проведення досліджень у даній сфері. В наш час метод холодного газодинамічного напилення для нанесення захисних та відновлювальних покриттів досить широко застосовується в аерокосмічній, автомобільній та інших галузях техніки. Разом з відмінними експлуатаційними, властивостями обладнання для методу ХГННТ існують і недоліки: низький коефіцієнт використання матеріалу, можлива пористість, що призводить до зниження міцності та погіршення корозійної стійкості. Для усунення перерахованих вище недоліків застосовують обладнання високого тиску, що дозволяє забезпечити задані властивості поверхонь і розширити галузі застосування методу холодного газодинамічного напилення; разом з тим на кілька рівнів зростають витрати на обладнання та супутні витрати. В наш час холодне газодинамічне напилення високого тиску має показники коефіцієнта використання матеріалу близько 85–90 відсотків. Але цей метод має недоліки: висока вартість облад-

нання і процесу напилення, низька мобільність обладнання, загроза здоров'ю персоналу і т.д. Зростаючий попит на низькоенергетичні, екологічно безпечні, ефективні й недорогі процеси нанесення покриттів стимулюють пошук і розробку нових альтернативних методів, одним з яких є ХГННТ. Проведений аналіз сучасного стану питання в галузі впливу на кількісні та якісні показники утворюваних захисних та відновлювальних покриттів і вивчення властивостей таких покриттів, отриманих методом ХГННТ, показали, що необхідне більш глибоке вивчення впливу на температурно-швидкісні параметри часток напилюваного матеріалу газодинамічних та сторонніх процесів.

Ключові слова: холодне газодинамічне напилювання, покриття, підкладка, властивості покриттів, ефективність.

Волков Андрій Олегович¹, інженер кафедри технології виробництва авіаційних двигунів, тел.+380996641007, e-mail: a.volkov@khai.edu

¹Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», 61070, Україна, м. Харків, вул. Чкалова, 17.

Overview of cold gas dynamic dusting: problems and prospects

Abstract. Problem. At present, the method of cold gas-dynamic coating for application of protective and restorative coatings is widely used in aerospace, automotive and other industries. Along with the excellent operational properties of the equipment for the method of CS there are also disadvantages: low coefficient of material use, possible porosity, which leads to a decrease in strength and deterioration of corrosion resistance. To eliminate the aforementioned shortcomings, high-pressure equipment is used to ensure the specified properties of surfaces and expand the application of the method of cold gas-dynamic spraying, at the same time, the costs of equipment and associated costs are multiplied by

several levels. **Goal.** The analysis of the current state of the problem in the field of low pressure cold gas-dynamic spraying (CS) on the possibility of influencing the quantitative and qualitative indices of the protective and restorative coatings created by this method and the study of the properties of such coatings was conducted in order to gain experience for further research in this field. **Methodology.** An analysis of literary sources led to the conclusion that it is necessary to revise the principle of modeling and development of equipment for producing coatings by the method of cold gas-dynamic spraying. **Results.** The analysis of the current state of the issue in the field of influence on the quantitative and qualitative indicators of the protective and restorative coatings created by this method and the study of the properties of such coatings obtained by the method of CS showed that a more profound study of the influence on the temperature-speed parameters of particles of the spray material by gas-dynamic and external forces is required. **Originality.** The increasing demand for low-energy, environmentally safe, efficient and low-cost coating processes stimulates the search for and development of new alternative methods, one of which is cold spraying. **Practical value.** A third-party effect on the particle speed of the sprayed powder will not only reduce the temperature effect and, as a result, possible negative effects, but also significantly reduce the energy and material costs of the process, due to the rejection of expensive high-pressure equipment, as well as increase the efficiency of the process when working with low pressure.

Key words: cold gas-dynamic spraying, coatings, substrate, coating properties, efficiency.

Volkov Andrej¹, Engineer of Dept. of aircraft engine manufacturing technologies, tel. +380996641007, e-mail: a.volkov@khai.edu

¹National Aerospace University Kharkiv Aviation Institute, 61070, Ukraine, Kharkiv, Chkalova street, 17.