

МЕТОДЫ НАНЕСЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ

А.И. Каширин, А.В. Шкодкин (Обнинский центр
порошкового напыления, Калужская обл.)

Метод газодинамического напыления металлических покрытий: развитие и современное состояние

Представлены возникновение, развитие и современное состояние нового метода создания толстых металлических покрытий – газодинамического напыления. Рассмотрены особенности и основные параметры метода. Приведены последние мировые достижения в области газодинамического напыления. Описаны существующее оборудование и области применения метода.

The origin, development and modern state of the gas dynamic spraying, the new method of thick metal coatings creation, are presented. The features and main parameters of the method are discussed. The last achievements in gas dynamic spraying, known equipment and method applications are described.

Метод газодинамического напыления (ГДН) металлических покрытий, впервые предложенный российскими учеными около 20 лет назад, привлекает все большее внимание исследователей и специалистов.

Этот метод можно назвать настолько новым, что в обширной монографии Г.В. Боброва [1], классифицирующей все известные методы нанесения неорганических покрытий, газодинамическому напылению посвящен всего один абзац. В последние годы появляется все большее количество публикаций, связанных с исследованием и применением этого метода. Показательно, что на ежегодной международной конференции по газотермическому нанесению покрытий в Сиэтле (США) [2] в 2006 г. было представлено 35 докладов, связанных с исследованиями в этой области, а на аналогичном европейском форуме в Эрдинге (Германия) почти половина докладов была посвящена процессу газодинамического напыления.

Столь интенсивные исследования в этой области связаны с принципиально важной особенностью метода ГДН – созданием металлических покрытий посредством закрепления на обрабатываемой поверхности нерасплавленных металлических частиц. В отличие от хорошо известных газотермических методов ГДН обеспечивает существенно меньшую пористость покрытий, значительно снижаются термические нагрузки на материалы основы и покрытия, уменьшается окисление материалов, устраняются процессы неравновесной кристаллизации в наносимом покрытии. Эти особенности обуславливают возможность применения газодинамического способа нанесения металлических покрытий в областях техники, где

применение газотермических способов затруднительно или вообще невозможно.

Цели настоящей работы – представить широкому кругу специалистов, работающих в области нанесения металлических покрытий, сущность метода и его развитие от зарождения до настоящего времени, а также познакомить их с существующим оборудованием для нанесения металлических покрытий газодинамическим методом.

Развитие метода ГДН

Исторически возникновение метода газодинамического напыления металлических покрытий можно связать с обнаружением закрепления частиц алюминия на лобовой поверхности преграды при ее обтекании сверхзвуковым двухфазным потоком в Институте теоретической и прикладной механики СО АН СССР (ИПТМ) в Новосибирске [2]. Выполнив специальные исследования по взаимодействию двухфазного потока с преградой, А.П. Алхимов, В.Ф. Косарев и А.Н. Папырин установили, что при превышении некоторого значения скорости потока, которое было названо *критической скоростью*, может происходить осаждение толстого слоя твердых металлических частиц на преграде. Авторы назвали этот процесс методом *"холодного" газодинамического напыления* [3, 4].

Сущность метода, в принципе, достаточно проста. Разогнанные потоком газа до скорости 500...1000 м/с металлические частицы, находящиеся в нерасплавленном состоянии, при столкновении с преградой испытывают сильную деформацию и закрепляются

на поверхности, образуя толстое покрытие. Таким способом авторам удалось получить покрытия из многих металлов (Al, Cu, Zn, Ni, Co, V, Fe, Ti и др.) и их сплавов и смесей.

Однако уже при первых исследованиях было обнаружено, что вместе с резким ростом эффективности осаждения частиц при скорости выше критической могут наблюдаться снижение степени их деформации, уменьшение твердости покрытия и рост его пористости [4]. Кроме того, для достижения критической скорости частицами в большинстве случаев требуется использование одноатомных газов, например гелия, что сильно затрудняет практическое применение метода.

Тем не менее привлекательность метода ГДН способствовала расширению исследований, причем их основным направлением явились как изучение характеристик получаемых покрытий, так и разработка оптимальных режимов их создания и поиски возможностей практической реализации метода.

Основные параметры процесса ГДН

Основные, наиболее общие требования для процесса осаждения нерасплавленных металлических частиц методом газодинамического напыления, заявленные в патенте на способ напыления [5], представлены в работе [6] в следующем виде:

- температура ускоряющего потока газа должна быть ниже температуры плавления или теплового размягчения материала частиц;
- размер частиц должен быть равен 1...50 мкм;
- скорость частиц должна быть в диапазоне 300...1200 м/с в зависимости от материала и размера частиц.

Автором [8] приведен типичный диапазон параметров двухфазного потока для "холодного" газодинамического напыления:

Давление торможения потока, МПа	1...3
Температура торможения потока, °С	0...700
Расход газа, м ³ /мин	1...2
Подача порошкового материала, кг/ч	5...15
Дистанция напыления, мм	10...50
Потребляемая мощность (для нагрева газа), кВт	5...25
Размер частиц, мкм	1...50

Указанные параметры явились отправными для исследований процесса ГДН.

Параметры несущего газа. Так как ускорение частиц для газодинамического напыления производится газовым потоком, то в первую очередь внимание обращается на достижение высокой скорости газа. Скорость течения газа напрямую связана со скоростью звука c в этом газе, которая определяется молярной

массой газа μ , с постоянной адиабаты γ , равной отношению теплоемкостей C_p/C_v , и с абсолютной температурой газа T :

$$c = \sqrt{\frac{\gamma RT}{\mu}} \quad (1)$$

Здесь R — универсальная газовая постоянная. Значения скорости звука при температуре 0 °С для некоторых газов приведены в табл. 1.

Для получения сверхзвуковых потоков газа его ускорение производится в сверхзвуковых соплах — соплах Лавала, включающих сужающуюся и расширяющуюся части. При этом в критическом (самом узком) сечении сопла скорость газа равна значению локальной скорости звука, а в расширяющейся выходной части сопла она может в несколько раз превышать скорость звука.

Из данных табл. 1 видно, что высокие скорости газового потока гораздо легче достигаются при использовании гелия, нежели обычного воздуха. Именно поэтому для процесса ГДН предпочтительно применять гелий или его смесь с воздухом.

Из формулы (1) следует, что нагрев газа способствует увеличению скорости звука в газе и, следовательно, скорости газового потока в сверхзвуковом сопле. Это свойство широко используется в устройствах для напыления. Затрачиваемая на нагрев мощность может достигать нескольких десятков киловатт, а температура используемого сжатого газа — нескольких сотен градусов. При таких величинах нагрева способ "холодного" газодинамического напыления становится скорее "теплым" или даже "горячим", но сущностью процесса остается осаждение частиц в твердом, нерасплавленном состоянии.

В газовом потоке ускорение a частицы массой m , связано с коэффициентом аэродинамического сопро-

Таблица 1

Значения скорости звука при температуре 0 °С для некоторых газов

Газ	Скорость звука, м/с	Адиабатическая постоянная	Молярная масса, г/моль	Плотность, кг/м ³
Воздух	331	1,40	29	1,29
Азот	334	1,40	28	1,25
Неон	435	1,66	20	0,90
Гелий	965	1,66	4	0,18
Водород	1284	1,40	2	0,09

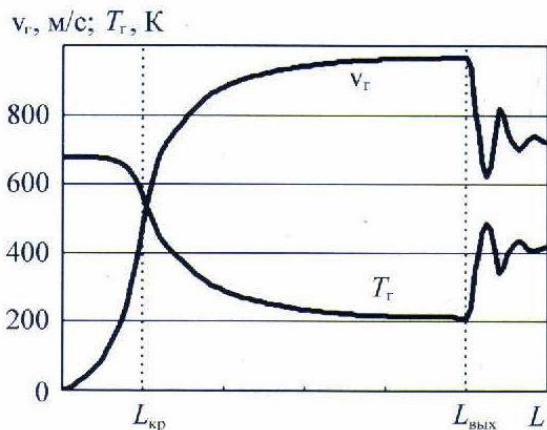


Рис. 1. Характерное изменение значений скорости v_g и температуры T_g газа вдоль оси сопла (штриховой линией отмечены положения критического $L_{кр}$ и выходного $L_{вых}$ сечений сопла)

тивления частицы C_d , площадью эффективного сечения частицы $S_{ч}$, плотностью ускоряющего газа ρ_g и разностью скоростей газового потока v_g и частицы $v_{ч}$ как

$$a = \frac{C_d S_{ч} \rho_g (v_g - v_{ч})^2}{2m_{ч}} \quad (2)$$

Важно отметить, что кроме явной зависимости от параметров процесса дополнительно и сам коэффициент аэродинамического сопротивления C_d зависит как от формы и размера частицы, так и от параметров взаимодействующего с ней газа: скорости, плотности, вязкости, температуры. Таким образом, не только скорость газового потока, но и другие его параметры, а также характеристики частиц определяют эффективность процесса ускорения.

В расширяющейся части сверхзвукового сопла происходит адиабатическое расширение газа, что одновременно с увеличением скорости газового потока приводит к уменьшению его плотности и температуры. Характерные изменения скорости и температуры газа при движении потока в сверхзвуковом сопле представлены на рис. 1.

Давление торможения ускоряющего газа является определяющим фактором для формирования потока. Повышение давления позволяет увеличивать степень расширения (раскрыва) сопла, что способствует росту скорости газового потока. Кроме того, существенное влияние на характер течения газа оказывает торможение потока на стенках сопла, в котором он ускоряется. Это ограничивает длину сопла и, естественно, время ускорения частиц в сопле. Увеличение давления рабочего газа и степени расширения сопла позволяет снизить это влияние. Применяемые в разрабатываемых установках для ГДН давления газа обычно составляют 1,5...3,5 МПа.

Сопла для напыления. Площадь выходного сечения и длина сверхзвукового сопла напрямую связаны с полным расходом и давлением ускоряющего газа. При давлениях и расходах, типичных для ГДН, выходной диаметр сопла круглого сечения не может, как правило, превышать 8...10 мм. Увеличение выходного диаметра сопла в 2 раза приведет к необходимости увеличения расхода газа в 4 раза. Реальные практические ограничения на расход газа около 1...2 м³/мин не позволяют заметно увеличить размеры выходного сечения сопла.

Ширину полосы напыления можно увеличить посредством увеличения одной из сторон сопла при сохранении площади его поперечного сечения. Для этого, а также в целях уменьшения торможения частиц в ударном слое перед преградой на начальном этапе исследований процесса ГДН были выбраны плоские сопла прямоугольного поперечного сечения. Чем меньше один из размеров выходного сечения сопла, тем меньше отход ударной волны и меньше торможение частиц за ударной волной перед преградой. Однако значительное уменьшение одного из поперечных размеров сопла прямоугольного сечения из-за нарастания влияния пограничного слоя приводит к уменьшению скорости газа и, следовательно, скорости частиц на выходе из сопла. В последнее время в большинстве исследований и вариантов практического применения метода используются в основном сопла круглого сечения.

Для приобретения частицей высокой скорости необходимо увеличивать время ее пребывания в ускоряющем потоке газа. Это накладывает требования к длине сверхзвукового сопла. На рис. 2, а приведены характерные скорости газа и частиц меди размером 5 и 25 мкм, достигаемые при движении вдоль оси сопла.

Видно, что увеличение длины сопла ведет к росту скорости частиц. Однако полная допустимая длина сопла, так же как и площадь его поперечного сечения, связана с параметрами ускоряющего газа. Увеличение длины сопла неизбежно влечет за собой и необходимость повышения давления газа.

Определение оптимальных параметров разгонных сопел является одним из важных аспектов исследования процесса ГДН.

Требования к характеристикам используемых частиц. Из формулы (2) следует, что масса, размер и форма частиц оказывают значительное влияние на возможность их ускорения газовым потоком. Естественно, чем легче частицы, тем быстрее они достигают высокой скорости. Однако после выхода из сопла происходит торможение ускоренных частиц в слое газа, заторможенного у преграды. Для легких частиц это ведет к резкому снижению скорости при взаимо-

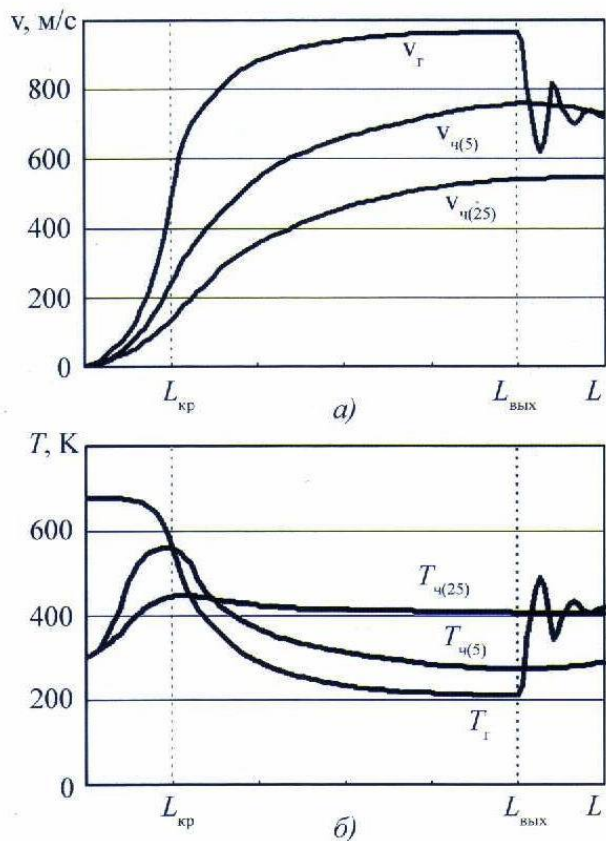


Рис. 2. Характерное изменение скоростей газа v_g и частиц меди размером 5 мкм $v_{ч(5)}$ и 25 мкм $v_{ч(25)}$ (а) и температуры газа T_g и частиц меди $T_{ч(5)}$, $T_{ч(25)}$ (б) вдоль оси сопла

действию с преградой. В то же время чем тяжелее частицы, тем хуже они разгоняются потоком, но тем лучше сохраняют скорость при приближении к преграде. Именно поэтому соотношение плотности материала частиц, их размера и формы является важным фактором для оптимизации процесса ГДН.

Один из самых существенных факторов для исследуемого процесса – твердость материала частицы. Так как закрепление металлической частицы на преграде происходит при развитии пластической деформации в зоне контакта, то частицы из более мягких материалов требуют меньших скоростей для закрепления. Для закрепления частиц твердых металлов необходимо значительно увеличивать их скорость.

Снизить твердость материала частицы можно посредством ее предварительного нагрева, используя зависимость твердости от температуры. Это частично применяется при предварительном нагреве несущего газа. Однако при адиабатическом расширении в сопле температура газа значительно снижается, так что предварительный нагрев газа чаще всего лишь компенсирует снижение температуры частиц. На рис. 2, б представлены характерные температуры газа и медной частицы диаметром 5 и 25 мкм при движении вдоль оси сопла при начальной температуре газа 673 К.

Скорость нагрева и охлаждения частиц в потоке газа зависит также и от теплопроводности и теплоемкости материала частиц, и от их размера. Поэтому оптимизация процесса ГДН неизбежно включает выбор не только режима течения газа, но и подходящих порошковых материалов.

Свойства получаемых покрытий. Отличительной особенностью покрытий, наносимых методом ГДН, является сохранение химического состава исходного порошкового материала. Так как процесс протекает при температурах, намного меньших температуры плавления материала частиц, в покрытие, естественно, практически не происходит ни фазовых превращений, ни образования новых соединений, ни значительного окисления материала.

Характерной для таких покрытий является и низкая пористость, что связано с сильной деформацией частиц в процессе нанесения покрытия.

При ударе ускоренных твердых частиц о преграду происходит их интенсивная деформация. Значительное локальное выделение теплоты в зоне контакта вызывает локальное повышение температуры, что способствует снижению твердости и усилению деформации вблизи поверхности контакта. При этом степень деформации частиц может достигать 80 %. Это обуславливает высокую прочность сцепления покрытий с основой, которая составляет обычно 30...80 МПа. Несмотря на наличие внутренних напряжений в покрытиях, нанесенных методом ГДН, которые связаны с наклепом материала покрытия, термические напряжения остаются очень незначительными, что способствует высокой адгезии даже для слоев толщиной 10 мм и более.

В результате интенсивной ударной деформации частиц плотность дефектов кристаллической решетки материала покрытия значительно возрастает. Дефектность кристаллической решетки, повышающая прочность частиц в покрытии, и наличие между частицами резких границ без диффузионной зоны, обусловленное малым временем и температурой взаимодействия, приводят к снижению относительного удлинения материала покрытия до значений менее 1 %. Практически все покрытия, полученные методом ГДН, являются достаточно хрупкими. В то же время сильный наклеп материала покрытия в процессе нанесения вызывает значительный рост его твердости. Последующая термообработка покрытия может обеспечить увеличение относительного удлинения и снижение твердости материала покрытия.

Исследование и развитие процесса ГДН

Названный авторами [4] методом "холодного" газодинамического напыления способ нанесения

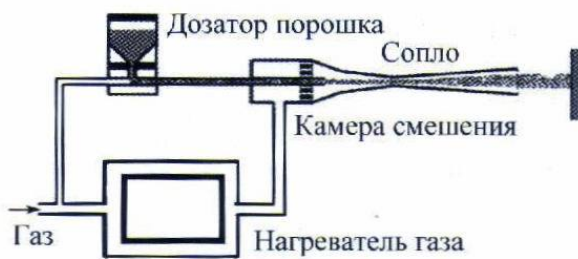


Рис. 3. Схема классической установки ГДН [8], включающей нагреватель газа, герметичный порошковый питатель, камеру смешения и сопло Лавала

покрытий за счет высокой кинетической энергии нерасплавленных металлических частиц в настоящее время стал широко известен в мире как "холодное напыление" ("Cold Spray").

Развитие метода шло и происходит в настоящее время несколькими путями. Основная часть исследований и разработок осуществляется в рамках ставшего классическим подхода, включающего создание двухфазной смеси и ускорение ее в сверхзвуковом сопле (рис. 3).

В лаборатории физики многофазных систем ИТПМ СО АН (Новосибирск) А.П. Алхимов, В.Ф. Косарев и С.В. Клинков продолжили и развили теоретические и экспериментальные исследования метода [7, 8]. Значительная часть их исследований посвящена оптимизации разгонных сопел [9–12]. Детальное изучение процессов ускорения и торможения сверхзвуковых двухфазных течений позволило вывести аналитические формулы для оценок скорости частиц на выходе из сопла, учитывающие концентрацию, размер и плотность частиц при разных давлениях, температурах и составе ускоряющего газа. Это позволяет проектировать сопла с оптимальным профилем и выбирать наилучшую для процесса напыления дистанцию от среза сопла до обрабатываемой поверхности.

В последнее время новосибирскими исследователями совместно с А.Н. Папыриным разрабатывается статистическая модель процесса, основанная на концепции активации поверхности при скоростном взаимодействии частиц с преградой [13–15].

Изучение влияния теплообмена струи с преградой [16, 17] и степени деформации частиц при ударе о преграду [18, 19] позволили оптимизировать режимы процесса напыления и разработать несколько установок, включая ручную модель [20], для практического применения метода. Однако практическое применение столкнулось с проблемой ограниченных возможностей предприятий-потребителей по расходу несущего газа. Применение гелия в промышленных масштабах оказывается слишком дорого, а применение воздуха при давлении ниже 1,5 МПа не всегда обеспе-

чивает высокое качество покрытий [21]. Тем не менее детальные исследования позволили разработать и поставить опытные и экспериментальные образцы установок в МАИ (Москва), фирму "Рик-С" (Москва), корпорацию "Даймлер Бенц" (Германия), Институт исследования металлов Китайской академии наук (Шэньян, Китай), Международный центр передовых технологий и порошкового напыления (Хайдарабад, Индия).

Значительное количество исследований в России было направлено на поиск технических решений, оптимизирующих применение метода ГДН и позволяющих использовать воздух в качестве ускоряющего газа. Так, В.К. Крыса и А.Г. Мухамедзянов разработали варианты метода с наложением двух сверхзвуковых потоков [22], П.В. Никитин и А.Г. Смолин предложили устройство с кольцевым сверхзвуковым соплом [23], Ю.В. Дикун объединил в устройстве процессы подготовки поверхности и нанесения покрытия [24]. На основе разработок Ю.В. Дикуну предприятием "Интерметкомполит" (Москва) изготовлен промышленный вариант установки для газодинамического напыления НГА-5 мощностью 18 кВт, использующей в качестве рабочего газа воздух с давлением до 1,5 МПа.

В Украине исследования метода ГДН проводились А.Н. Головки и В.Н. Данченко в Металлургической академии (Днепропетровск) [25, 26]. Применяя в качестве ускоряющего газа воздух с температурой 250 °С и давлением 1,8 МПа, они нашли возможным использовать частицы размером более 50 мкм вследствие их медленного остывания в расширяющейся части сопла при адиабатическом охлаждении сверхзвуковой струи.

В США исследования в области ГДН были начаты в середине 1990-х годов в рамках совместного проекта исследований и разработок А.Н. Папыриным [6] вместе с американскими коллегами в Sandia National Laboratories (Альбукерк, Нью Мексико) [27, 28]. В результате была создана базовая установка газодинамического напыления, и фирма Ktech представила промышленную компьютеризированную систему для ГДН, использующую газ с давлением до 3 МПа и мощностью до 25 кВт. Появление в США этой установки стимулировало исследования процесса газодинамического напыления в ASB Industry Corp., лаборатории Delphi Corp. и др.

Разработки в ASB Industry Corp. были в первую очередь направлены на совершенствование эксплуатационных возможностей установки [29]. Проблемы эксплуатации были связаны в основном с осаждением металлических частиц в критическом сечении сопла при значительном нагреве двухфазной смеси [30]. В дальнейшем исследования включили и прикладные

аспекты процесса напыления и создания покрытий [31, 32].

В лаборатории Delphi Corp. изучены возможности напыления частицами размером 50...150 мкм [33]. Как и в [25], было обнаружено, что увеличение пластичности частиц при нагреве двухфазной смеси позволяет им закрепляться на основе при меньшей скорости, а крупные частицы медленнее остывают при адиабатическом охлаждении разгоняющего газа [34, 35]. Увеличение нагрева также потребовало решения проблемы налипания частиц в критическом сечении сопла [36].

Исследования, проводимые в исследовательской Лаборатории вооруженных сил США (Абердин, Мэрилэнд) [37, 38] и в Университете Пенсильвании [39], направлены как на оптимизацию процесса нанесения покрытий, в частности на улучшение характеристик разгонных сопел и подбор оптимальных порошковых материалов для ГДН, так и на изучение свойств получаемых покрытий и определение возможностей их применения для разных технических задач.

В Великобритании изучение процесса ГДН выполняется в университетах Кембриджа, Ливерпуля и Ноттингема. Основные исследования направлены на изучение свойств покрытий, реализуемых методом ГДН при использовании чистого гелия, и поиск возможностей создания деталей заданной формы непосредственно путем газодинамического напыления [40, 41].

Значительные субсидии правительства Канады обеспечили проведение в Университете Оттавы широкого исследования процесса ГДН и свойств покрытий, получаемых как с использованием чистого гелия, так и с применением азота. Значительная часть исследований в Канаде направлена на совершенствование процесса разгона частиц в соплах и изучение возможностей применения покрытий в разных технологических процессах [42–44].

В Японии К. Сакаки в Университете Шиншу (Нагано) посвятил исследования оптимизации сопла для ГДН. При этом он нашел возможным значительно увеличить длину сопла для разгона тяжелых частиц [45] и применил радиальный ввод порошка за критическим сечением сопла, что позволило избежать проблемы осаждения частиц в критическом сечении сопла при сильном нагреве, но сократило участок их ускорения.

Наиболее активные исследования в Китае проводятся в Институте материалов Университета провинции Шиангчи. Они направлены на оптимизацию параметров процесса и исследование свойств покрытий при использовании разных порошковых материалов [46, 47].

Интенсивные и наиболее последовательные исследования метода ГДН проводятся в Германии в Университете Бундесвера (Гамбург) под руководством Х. Крейе. На основании результатов математического моделирования [48] и экспериментальных исследований [49, 50] немецкими исследователями создана детальная модель процесса и найден критерий закрепления частиц в покрытии. Они установили, что при ударе частицы о преграду в случае превышения критической скорости возникает адиабатическая сдвиговая нестабильность, стимулирующая пластическую деформацию частицы и приводящая к ее закреплению на преграде. На основании исследований были определены значения критической скорости для частиц разных металлов и разработаны оптимизированные сопла круглого сечения для процесса ГДН.

Базируясь на этих исследованиях, фирма CGT (Ампфинг, Германия) разработала и начала выпуск установки для газодинамического напыления Kinetics-3000 [51]. С помощью этой установки мощностью 30 кВт можно наносить покрытие из разных металлов и сплавов. Однако для достижения высокой эффективности осаждения и создания качественных покрытий при использовании в качестве рабочего газа азота требуются порошки довольно узких фракций. В ряде случаев для увеличения эффективности необходимо применение в качестве ускоряющего газа гелия или его смеси с азотом с давлением до 3 МПа и расходом до 2 м³/мин.

Последующие исследования в лаборатории Х. Крейе несколько изменили представления о критической скорости. Было установлено, что частицы из одного и того же материала, но с разными размерами и температурами могут иметь различные критические скорости [52]. Это послужило основанием для повышения температуры нагрева двухфазной смеси и увеличения размера частиц [53]. Используя эти результаты, фирма CGT ввела дополнительный участок нагрева двухфазной смеси перед соплом в установке Kinetics-4000 [54], что позволило использовать для напыления порошков широких фракций азот с давлением 3 МПа и температурой торможения до 900 °С.

Появление на мировом рынке установки Kinetics-3000 позволило начать исследования в области газодинамического напыления в Бельгии, Франции, Австралии и др. Во многих случаях они ориентированы на использование в качестве разгоняющего газа гелия, но, возможно, с появлением установки Kinetics-4000 значительная часть исследований будет выполняться только с применением азота.

Кроме исследований и разработок в рамках ставшего классическим подхода, включающего создание двухфазной смеси и ее ускорение в сверхзвуковом

сопле с использованием высоких давлений разгоняющего газа, независимо развиваются еще два альтернативных направления метода ГДН.

В США Р. Таппхорн отметил, что скорость звука в гелии достаточно велика для ускорения частиц даже в дозвуковых потоках [55]. Если использовать дозвуковые скорости в потоке гелия, то не происходит снижения плотности и без того легкого газа, что способствует лучшему ускорению частиц. В компании Inovati (Санта-Барбара, Калифорния) был разработан метод "кинетической металлизации", который использует гелий при существенно меньших давлениях, чем классический метод ГДН [56, 57]. Применение сопла специального профиля позволяет осуществлять напыление в дозвуковом режиме. При этом нагрев частиц происходит не только в зоне ввода порошковой смеси, но и на всем пути ускорения частиц в отличие от сверхзвуковых методов, ведущих к остыванию частиц в ускоряющем потоке. Схематически установка "Иновати" не отличается от классических установок ГДН, но благодаря применению дозвуковых сопел использует существенно меньшие давления и потребляемую мощность.

Радикально изменили подход к методу ГДН исследователи из Обнинского центра порошкового напыления под руководством О.Ф. Ключева. Поставив задачу реализовать метод газодинамического напыления при ускорении частиц только воздухом с давлением не более 1 МПа, они нашли ее решение в использовании для напыления не чистых металлических порошков, а их смесей с керамическими порошками [58, 59]. В их подходе недостаток кинетической энергии металлических частиц компенсируется кинетической энергией частиц керамики, подаваемых в ускоряющий газовый поток одновременно с частицами металла. Ускоренные керамические частицы, взаимодействуя с основой, обеспечивают динамическую обработку формируемого покрытия, что позволяет получать плотные однородные покрытия из пластичных металлов, таких как алюминий, медь, цинк, никель. Разработанный процесс динамической металлизации был назван **технологией ДИМЕТ** [60].

Вследствие сильного эрозионного воздействия керамических частиц на профиль сопла метод потребовал радикального изменения подхода к реализации процесса напыления и, в первую очередь, исключения прохождения частиц через критическое сечение сопла. Создание устройства (рис. 4) с вводом порошковой смеси в расширяющуюся часть сопла за его критическим сечением позволило реализовать метод ГДН в оборудовании, которое использует для работы сжатый воздух с давлением всего 0,5 МПа [61–63].

Низкие требования к ускоряющему газу и малая потребляемая мощность обеспечили возможность

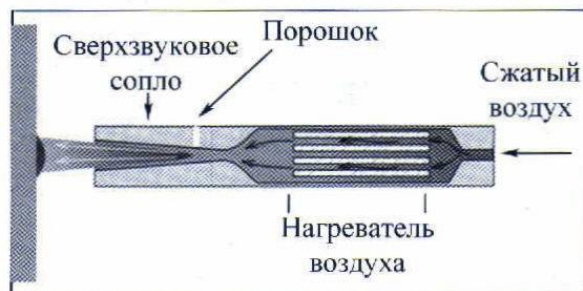


Рис. 4. Схема установки ДИМЕТ, включающей нагреватель газа, открытый порошковый питатель, узел инъекции порошка в расширяющуюся часть сопла и сопло Лавала

создания портативных установок, использующих технологию ДИМЕТ. В Обнинском центре порошкового напыления (ОЦПН) налажен выпуск портативных установок серии "ДИМЕТ" [63], применимых даже в условиях небольших предприятий. Компания CenterLine (Виндзор, Канада) начала производство мобильных установок на основе этой технологии [64].

Появление компактных устройств с низкими требованиями к расходуемому газу способствовало развитию исследований в области газодинамического напыления при малых давлениях [65, 66] и возникновению терминов "ГДН высокого давления" ("high pressure cold spray") и "ГДН низкого давления" ("low pressure cold spray") [2].

Таким образом, значительное количество исследований и разработок в последнее десятилетие привело как к углубленному пониманию процессов, происходящих при газодинамическом напылении, так и к созданию оборудования для практического применения.

Развитие подходов к методу ГДН хорошо отражает иллюстрация, представленная Х. Крейе в 2006 г. на конференции в Эрдинге [67]. На рис. 5 показаны этапы изменения подходов в классическом методе при

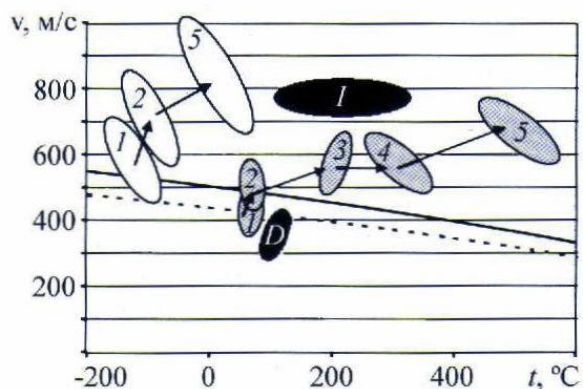


Рис. 5. Скорость и температура частиц меди перед преградой в процессе ГДН для установок Kinetics на разных стадиях разработки (1–5) при использовании гелия (белые эллипсы) и азота (серые эллипсы), а также для установок Inovati и ДИМЕТ (соответственно черные эллипсы I и D)

использовании гелия (белые эллипсы) и азота (серые эллипсы) с давлением 3 МПа. Эллипсы очерчивают зоны температур и скоростей, реализуемых при ударе о преграду для частиц меди размером 20...50 мкм. Оптимизация параметров разгонных сопел и увеличение температуры нагрева газа привели к росту скорости и температуры частиц, что отражает отмеченные зоны 1–5. Там же в виде черных эллипсов показаны зоны, реализуемые в альтернативных подходах технологий "Inovati" (I) и "ДИМЕТ" (D), а также значения критической скорости для частиц меди размером 20 мкм ($v_{кр(20)}$) и 50 мкм ($v_{кр(50)}$) при соответствующих температурах на выходе из сопла.

Путь развития процесса ГДН (см. рис. 5) показывает, что в рамках классического подхода изменения направлены на увеличение скорости и температуры частиц, достигаемое как оптимизацией профиля и конструкции сопла, так и ростом энергозатрат в процесс. В настоящее время обеспечивается осаждение частиц меди размером 20...70 мкм с эффективностью более 90 % и прочностью сцепления с основой около 80 МПа при использовании азота с расходом до 2 м³/мин и давлением 3 МПа, нагреваемого до 900 °С. Такой же результат может быть достигнут при использовании гелия, но температура нагрева газа при этом может быть почти в 2 раза меньше.

Технология "Inovati" позволяет проводить напыление только гелием, но с существенно меньшим давлением и расходом газа, так как разгон частиц осуществляется в дозвуковом режиме течения газа. При этом требуются и меньшие мощности для нагрева ускоряющего газа. На рис. 5 область температур и скоростей частиц при ударе о преграду представлена черным эллипсом с указателем "I". Для этого процесса также характерна высокая эффективность напыления – до 60 %, но вследствие меньших расходов газа уменьшена его общая производительность.

Для экономии гелия разработаны системы его рекуперации, но для этого процесс напыления должен выполняться в герметичном объеме.

Технология "ДИМЕТ" использует для процесса напыления воздух с расходом до 0,5 м³/мин и с давлением 0,5...0,8 МПа, что ограничивает возможную скорость частиц. Черный эллипс с указателем "D" на рис. 5 показывает реализуемую область температур и скоростей частиц. Эффективность осаждения собственно металлических частиц в этом процессе заметно ниже, чем в других методах ГДН. Она, как правило, не превышает 50 %. Так как керамические частицы, добавляемые в двухфазный поток по этой технологии, в основном отражаются от основы, то интегральная эффективность осаждения применяемых порошковых смесей составляет 20...30 %. Вследствие малого расхода газа общая производительность процесса так-



Рис. 6. Установка Kinetics-3000 производства CGT

же ограничена расходом порошкового материала до 0,5...0,6 г/с.

Оборудование для ГДН и практическое применение метода

Большое количество исследований в области ГДН, выполняемых в разных организациях, привело к созданию различных устройств, реализующих процесс. Собственные установки были разработаны и изготовлены в большинстве лабораторий, занятых исследованиями. Однако значительная их часть существует в единичных экземплярах для выполнения исследований и проведения специальных работ либо установки разрабатываются специально для решения конкретных задач.

Несколько организаций, однако, довели разработки до стадии изготовления оборудования для реализации потребителям. В настоящее время на рынке оборудования представлены серийные установки для газодинамического напыления предприятий CGT (Германия), "Интерметкомпозит" (Россия), Inovati (США) и ОЦПН (Россия). Первые два основываются на классическом подходе, последние используют альтернативные методы ГДН. Типовые характеристики установок приведены в табл. 2.

Установки Kinetics производства CGT (рис. 6) [51, 54], разработанные на основе исследований, выполненных под руководством Х. Крейе, нашли применение в промышленном производстве медных покрытий на алюминиевых радиаторах для электротехнической промышленности и используются рядом фирм для выполнения отдельных разовых заказов. Значительное количество этих установок используется в различных лабораториях в исследовательских целях. Ввиду высокого уровня шума для выполнения работ следует применять звукоизолирующую камеру. При использовании установок Kinetics рабочее сопло обычно закрепляют на манипуляторе промышленного робота.

Установки НГА производства "Интерметкомпозит" (рис. 7), использующие классический метод



Рис. 7. Установка НГА-5 производства "Интерметкомпозит"

ГДН, созданные на основании разработок Ю.В. Дикуну, а также их модификации с введением рабочего порошка за критическим сечением сопла, пока не нашли столь широкого применения. Вследствие меньшего энергопотребления и расхода газа возможно использование установок при ручной работе. Из-за меньших энергозатрат общая производительность и эффективность использования порошка в этих установках ниже, чем в установках Kinetics, но снижение требований к ускоряющему газу может способствовать их более широкому применению. Рабочее сопло установки НГА-5 может быть закреплено на манипуляторе или применяться для ручной работы на специальном кронштейне.

Установки КМ производства Inovati (рис. 8) применяют как для нанесения локальных алюминиевых покрытий на стальные конструкции, так и для создания специальных покрытий для космической и авиационной техники. Несмотря на высокую эффектив-

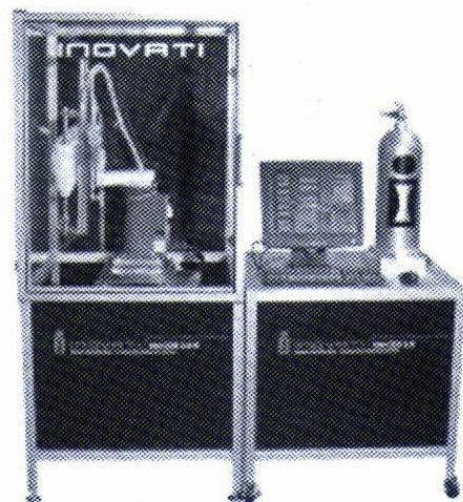


Рис. 8. Установка КМ производства Inovati

ность осаждения порошкового материала, они пока нашли ограниченное применение, что связано с необходимостью использования гелия для разгона частиц. Возможность рекуперации гелия и достаточно ограниченные объемы его использования могут способствовать росту применения этих установок. Для реализации процесса рекуперации гелия процесс напыления должен проводиться в герметичном объеме.

Значительно меньшие требования к ускоряющему газу и достаточно низкое энергопотребление характеризуют установки ДИМЕТ производства ОЦПН (рис. 9). Их выполняют в портативном варианте и используют главным образом в ручной работе, хотя в ряде приложений для напыления применяется автоматическое перемещение напылительного узла манипулятором. Несмотря на значительно меньшую производительность и эффективность использования порошка установки ДИМЕТ позволяют решать задачи и локального ремонта, и мелкосерийного производства. Вследствие компактности и относительно низких требований к газу установки ДИМЕТ нашли более широкое применение. Несколько сотен установок используются в России и за рубежом в ремонте и производстве.

Таблица 2

Типовые характеристики установок для газодинамического напыления

Характеристика	Производитель				
	CGT	ИТПМ	"Интерметкомпозит"	Inovati	ОЦПН
Оборудование	Kinetics	УХГН	НГА-5	КМ	ДИМЕТ
Рабочий газ	Азот/Гелий	Воздух/Гелий	Воздух	Гелий	Воздух
Давление, МПа	3,0...4,0	1,5...2,5	1,0...1,5	0,35	0,5...0,8
Расход, м ³ /мин	2...4	1,3	2	0,2	0,4
Мощность, кВт	47	15	18	2,5	3,5



Рис. 9. Портативная установка ДИМЕТ-405 производства ОЦПН

Применение оборудования для ГДН определяется его специфическими возможностями в сравнении с хорошо известными газотермическими способами. В первую очередь это отсутствие окисления напыляемого материала и низкие температуры нагрева обрабатываемой детали. Существенными факторами являются низкая пористость и малая газопроницаемость покрытий, а также высокая прочность сцепления с основой покрытий толщиной до 10 мм.

Из вариантов практического приложения метода ГДН в настоящее время уже достаточно хорошо отработано применение газодинамического напыления медных покрытий для улучшения электрических контактов и теплоотвода. В ИТПМ разработана и создана установка для омеднения алюминиевых кабельных наконечников. Установку Kinetics-3000 фирмы CGT применяют для омеднения алюминиевых радиаторов для электронной техники, установки ДИМЕТ – для омеднения алюминиевых контактов электролизеров и нанесения оловянных и алюминиевых покрытий на контактные площадки крупногабаритных медных шин, а также никеля и меди на поверхность контактных площадок мощных токопроводящих алюминиевых шин. Как правило, в электротехнических вариантах приложения метода наносятся относительно тонкие покрытия толщиной менее 1 мм.

Также достаточно тонкие покрытия наносятся для защиты от коррозии. Установку KM фирмы Inovati применяют для нанесения локальных алюминиевых покрытий на поверхность стальных металлоконструкций. Установки ДИМЕТ используют для локального цинкования сварных швов и выделенных участков стальных конструкций, для защиты оборудования свинцовыми и никелевыми покрытиями при работе в агрессивных средах. Никелевые и алюминиевые покрытия наносят для снижения скорости высокотемпературной коррозии.

Наиболее широко метод ГДН применяют для восстановления и изменения формы металлических деталей, в частности из алюминиевых сплавов. В этих случаях получают покрытия толщиной от десятых долей до десятков миллиметров, что позволяет говорить не о нанесении покрытий, а о наращивании металла. Так, фирмой Pghairig метод ГДН применяется для восстановления формы изношенных лопастей пропеллеров винтовых самолетов. Компактность оборудования "ДИМЕТ" позволяет использовать его в авторемонте для восстановления дефектов двигателей, в мелкосерийном производстве для устранения дефектов литья и в ремонте форм для формования полимеров.

Низкая газопроницаемость покрытий, нанесенных методом ГДН, позволяет восстанавливать герметичность металлических конструкций без применения полимеров. Так, оборудование ДИМЕТ можно применять и для ремонта тонкостенных радиаторов алюминиевых кондиционеров в авторемонтных мастерских, и для устранения микротечей в сварных соединениях изделий космической техники; его даже использовали для восстановления герметичности медной обшивки циклотрона в РИЦ "Курчатовский институт".

Возможность нанесения покрытий произвольной толщины на любые металлические и керамические поверхности позволяет методу ГДН находить все больше различных областей применения в производстве и ремонте машин и механизмов.

Заключение

Метод газодинамического напыления закономерно возник среди других способов нанесения металлических покрытий, заняв место в области меньших температур, но больших скоростей потоков. Те же процессы деформации и закрепления частиц, но реализуемые при существенно меньших температурах и, соответственно, при твердом, а не жидком состоянии частиц потребовали интенсивных исследований и разработки специального оборудования. К настоящему времени создан ряд моделей оборудования для нанесения покрытий методом ГДН, различающихся особенностями исполнения, типом используемого рабочего газа и спектром создаваемых покрытий.

Из-за отличий параметров процесса и в зависимости от предпочтений и представлений разных исследователей описанный метод напыления металлических покрытий имеет множество названий: "холодное напыление", "быстрое напыление", "кинетическая металлизация", "кинетическое напыление", "динамическая металлизация" и др. Однако несмотря на некоторые технические различия все подходы включают процесс ускорения частиц по законам газовой динамики и процесс динамического взаимодействия час-

тиц с основой. Поэтому использование термина "газодинамическое напыление" вполне полно описывает процесс и метод в целом.

В настоящее время наряду с ростом исследований в области ГДН наблюдается значительное расширение практического применения метода в ремонтных и производственных процессах. Можно с уверенностью сказать, что этот метод вошел в практику и занял свое место в ряду современных технологий создания металлических покрытий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бобров Г.В., Ильин А.А. Нанесение неорганических покрытий. М.: "Интернет Инжиниринг", 2004. 624 с.
2. Алхимов А.П., Нестерович Н.И., Папырин А.Н. Экспериментальное исследование обтекания тел сверхзвуковым двухфазным потоком // ПМТФ. 1982. № 2. С. 66–74.
3. Алхимов А.П., Косарев В.Ф., Папырин А.Н., Нестерович Н.И. Метод "холодного" газодинамического напыления: тез. докл. Междунар. рабоч. совещ. "Высокотемпературные запыленные струи в процессах обработки порошковых материалов". Новосибирск: ИТФ СО АН СССР, 1988. С. 100–103.
4. Алхимов А.П., Косарев В.Ф., Папырин А.Н. Метод "холодного" газодинамического напыления // Докл. АН СССР. 1990. Т. 315. № 5. С. 1062–1065.
5. Pat. 5302414 US. Gas Dynamic Spraying Method for Applying the Coating / A.P. Alkhimov, A.N. Papyrin, V.F. Kosarev, et al. 1994.
6. Papyrin A. Cold spray technology // Advanced Materials & Processes. 2001. Vol. 159. No. 11. P. 49–51.
7. Алхимов А.П., Косарев В.Ф., Папырин А.Н. Газодинамическое напыление. Экспериментальное исследование процесса напыления // ПМТФ. 1998. Т. 39. № 2. С. 182–188.
8. Klinkov S.V., Kosarev V.F. Measurements of cold spray deposition efficiency // J. of Thermal Spray Technology. 2006. Vol. 15. No. 3. P. 364–371.
9. Алхимов А.П., Клинков С.В., Косарев В.Ф., Папырин А.Н. Газодинамическое напыление. Исследование плоской сверхзвуковой двухфазной струи // ПМТФ. 1997. Т. 38. № 2. С. 176–183.
10. Алхимов А.П., Клинков С.В., Косарев В.Ф. Течение в сверхзвуковом сопле большого удлинения с прямоугольным сечением // Теплофизика и аэромеханика. 1999. Т. 6. № 1. С. 51–58.
11. Алхимов А.П., Клинков С.В., Косарев В.Ф. Натекание сверхзвуковой струи прямоугольного сечения на плоскую преграду // ПМТФ. 2000. Т. 7. № 2. С. 225–232.
12. Alkhimov A.P., Kosarev V.F., Klinkov S.V. The features of cold spray nozzle design // J. of Thermal Spray Technology. 2001. Vol. 10. P. 375–381.
13. Papyrin A.N., Klinkov S.V., Kosarev V.F. Modeling of particle-substrate adhesive interaction under cold spray process: proc. of ASM Cold Spray Conf. (Akron, Ohio, USA). ASM International, 2004.
14. Papyrin A.N., Kosarev V.F., Klinkov S.V. Effect of the substrate surface activation on the process of cold spray coating formation. Explore its surfacing potential: proc. of the Intern. Thermal Spray Conf. (Basel, Switzerland). DVS-Verlag GmbH, 2005.
15. Papyrin A.N., Kosarev V.F., Klinkov S.V. Effect of the coating erosion on the cold spray process // Building on 100

Years of Success: proc. of the Intern. Thermal Spray Conf. (Seattle, WA, USA). ASM International, 2006.

16. Алхимов А.П., Клинков С.В., Косарев В.Ф. Исследование взаимодействия двухфазного потока с нагретой поверхностью // Теплофизика и аэромеханика. 1998. Т. 5. No. 1. С. 67–73.
17. Алхимов А.П., Клинков С.В., Косарев В.Ф. Исследование теплообмена сверхзвуковой плоской струи с преградой в условиях газодинамического напыления // Теплофизика и аэромеханика. 2000. Т. 7. № 3. С. 389–396.
18. Особенности деформирования микрочастиц при ударе о твердую преграду / А.П. Алхимов, А.И. Гулидов, В.Ф. Косарев, Н.И. Нестерович // ПМТФ. 2000. Т. 41. № 1. С. 204–209.
19. Алхимов А.П., Клинков С.В., Косарев В.Ф. Экспериментальное исследование деформации и соединения микрочастиц с преградой при высокоскоростном ударе // ПМТФ. 2000. Т. 41. № 2. С. 47–52.
20. Установка газодинамического напыления переносного типа / А.П. Алхимов, В.Ф. Косарев, В.В. Лаврушин, О.А. Алхимов // Тр. 6-й Междунар. конф. "Пленки и покрытия". СПб. 2001. С. 221–225.
21. Токарев А.О. Строение алюминиевого порошкового покрытия, полученного холодным газодинамическим напылением // Металловедение и термическая обработка металлов. 1996. № 3. С. 36–39.
22. Пат. 2213805 РФ. Способ нанесения покрытий из порошковых материалов и устройство для его осуществления / В.К. Крыса, А.Г. Мухамедзянов, В.К. Семенченко. 2003.
23. Пат. 2193454 РФ. Устройство для нанесения покрытий на внешние поверхности деталей / П.В. Никитин, А.Г. Смолин. 2002.
24. Пат. 2181390 РФ. Установка для газодинамического нанесения покрытия из порошковых материалов / Ю.В. Дикун. 2002.
25. Данченко В.Н., Миленин А.А., Головкин А.Н. Теоретический анализ деформирования частиц порошка в процессе высокоскоростного напыления // Докл. Нац. академии наук Украины. 1995. № 11. С. 46–49.
26. Данченко В.Н., Кондратьев С.В., Головкин А.Н. Нанесение металлических покрытий методом газодинамического напыления // Металлургическая и горно-рудная промышленность. 1997. № 3. С. 46–49.
27. Dykhuizen R.C., Smith M.F. Gas dynamic principles of spray // J. of Thermal Spray Technology. 1998. Vol. 7. No 2. P. 205–212.
28. Impact of high velocity cold spray particles / R.C. Dykhuizen, M.F. Smith, D.L. Gilmore, et al. // J. of Thermal Spray Technology. 1999. Vol. 8. No. 4. P. 559–564.
29. Pat. 6502767 US. Advanced Cold Spray System / Kay A. and Karthikeyan J. 2003.
30. Pat. 6722584 US. Cold Spray System Nozzle / Kay A. and Karthikeyan J. 2004.
31. Microstructural characteristics of cold-sprayed nanostructured WC-Co coatings / R.S. Lima, J. Karthikeyan, C.M. Kay, et al. Thin Solid Films. 2002. Vol. 416. P. 129–135.
32. Effect of carrier gases on microstructural and electrochemical behavior of cold-sprayed 1100 aluminum coating / K. Balani, T. Laha, A. Agarwal, et al. // Surface and Coatings Technology. 2005. Vol. 195. P. 272–279.
33. Kinetic spray coatings / T.H. Van Steenkiste, J.R. Smith, R.E. Teets, et al. // Surface and Coatings Technology. 1999. Vol. 111. P. 62–71.

34. **Zhao Z.B., Gillispie B.A., Smith J.R.** Coating deposition by the kinetic spray process // *Surface and Coatings Technology*. 2006. Vol. 200. P. 4746–4754.
35. **Van Steenkiste T.H., Smith J.R.** Evaluation of coatings produced via kinetic and cold spray processes // *J. of Thermal Spray Technology*. 2004. Vol. 13. No. 2. P. 274–282.
36. **Pat. 6896933 US.** Method of maintaining a non-obstructed interior opening in kinetic spray nozzles // Van Steenkiste T.H., Hubert T., Smith J.R., et al. 2005.
37. **Champagne V., Helfrich D., Leyman P., et al.** Nozzle Design Influence on the Supersonic Particle Deposition Process / U.S. Army Research Lab. Aberdeen Proving Ground, MD: proc. of ASM Cold Spray Conf. (Akron, Ohio, USA). ASM International, 2004.
38. **Helfrich D., Champagne V.** Optimal particle size for the cold spray process / U.S. Army Research Lab. Aberdeen Proving Ground, MD // *Building on 100 Years of Success: proc. of the Intern. Thermal Spray Conf.* (Seattle, WA, USA). ASM International, 2006.
39. **Eden T., Wolfe D.E., Potter J., et al.** Cr₃C₂-Based coatings applied by high velocity particle consolidation (HVPC) for wear resistant applications / Applied Research Lab. The Pennsylvania State University: proc. of ASM Cold Spray Conf. (Akron, Ohio, USA). ASM International, 2004.
40. **Zhang D., Shipway P.H., McCartney D.G.** Particle-substrate interactions in cold gas dynamic spraying. *Advancing the Science and Applying the Technology: proc. of the Intern. Thermal Spray Conf.* (Orlando, FL, USA). ASM International, 2003.
41. **Calla E., McCartney D.G., Shipway P.H.** Deposition of copper by cold gas dynamic spraying: an investigation of dependence of microstructure and properties of the deposits on the spraying conditions. *Advances in Technology and Application: proc. of the Intern. Thermal Spray Conf.* (Osaka, Japan). ASM International, 2004.
42. **Jodoin B.** Cold spray nozzle mach number limitation // *J. of Thermal Spray Technology*. 2002. Vol. 11. No. 4. P. 496–507.
43. **Richer P., Jodoin B., Ajdelsztajn L., et al.** Effect of particle geometry and substrate preparation in cold spray. *Explore its surfacing potential: proc. of the Intern. Thermal Spray Conf.* (Basel, Switzerland). DVS-Verlag GmbH, 2005.
44. **Sansoucy E., Jodoin B., Richer P., Ajdelsztajn L.** Effect of spraying parameters on the microstructure and bond strength of cold spray aluminum alloy coatings // *Building on 100 Years of Success: proc. of the Intern. Thermal Spray Conf.* (Seattle, WA, USA). ASM International, 2006.
45. **Sakaki K.** Influence of Nozzle Geometry on Expansion State of Gas Jet and Metal Coating Properties in Cold Spray Faculty of Engineering / Shinshu University, Japan: proc. of ASM Cold Spray Conf. (Akron, Ohio, USA). ASM International, 2004.
46. **Li C.-J., Li W.-Y.** Deposition characteristics of titanium coating in cold spray // *Surface and Coatings Technology*. 2003. Vol. 167. P. 278–283.
47. **Li C.-J., Li W.-Y.** Examination of the critical velocity for deposition of particles in cold spraying. *Explore its surfacing potential: proc. of the Intern. Thermal Spray Conf.* (Basel, Switzerland). DVS-Verlag GmbH, 2005.
48. **Assadi H., Gartner F., Stoltenhoff T., Kreye H.** Bonding mechanism in cold gas spraying // *Acta Materialia*. 2003. Vol. 51. P. 4379–4394.
49. **Stoltenhoff T., Kreye H., Richter H.J.** An analysis of the cold spray process and its coatings // *J. of Thermal Spray Technology*. 2002. Vol. 11. No. 4. P. 542–550.
50. **Borchers C., Gartner F., Stoltenhoff T., Kreye H.** Microstructural bonding features of cold sprayed face centered cubic metals // *J. of Applied Physics*. 2004. Vol. 96 (8). P. 4288–4292.
51. **Richter P., Hoell H.** Latest technology for commercially available cold spray systems // *Building on 100 Years of Success: proc. of the Intern. Thermal Spray Conf.* (Seattle, WA, USA). ASM International, 2006.
52. **Schmidt T., Gartner F., Kreye H.** Development of a generalized parameter window for cold spray deposition // *Acta Materialia*. 2006. Vol. 54. P. 729–742.
53. **Schmidt T., Gaertner F., Kreye H.** New developments in cold spray based on higher gas- and particle temperatures // *Building on 100 Years of Success: proc. of the Intern. Thermal Spray Conf.* (Seattle, WA, USA). ASM International, 2006.
54. **Holl A., Richter P.** New components for cold spraying: proc. of the 7th Colloquium on HVOF Spraying (Erding, Germany). Gemeinschaft Thermisches Spritzen e.V., 2006.
55. **Tapphorn R.M., Gabel H.** The solid-state spray forming of low-oxide titanium components // *J. of Metals*. 1998. Vol. 50. № 9. P. 45–46, 76.
56. **Pat. 6715640 US.** Powder fluidizing devices and portable powder-deposition apparatus for coating and spray forming / Tapphorn R.M., Gabel H. 2004.
57. **Gabel H.** Kinetic metallization compared with HVOF // *Advanced Materials & Processes*. 2004. Vol. 162. No. 5. P. 47–48.
58. **Пат. 2038411 РФ.** Способ получения покрытий / Бuzдыгар Т.В., Каширин А.И., Ключев О.Ф., Портнягин Ю.И. 1993.
59. **Shkodkin A., Kashirin A., Klyuev O., Buzdygar T.** Metal particles deposition stimulation by surface abrasive treatment in gas dynamic spraying // *J. of Thermal Spray Technology*. 2006. Vol. 15. No. 3. P. 382–386.
60. **Shkodkin A., Kashirin A., Klyuev O., Buzdygar T.** The basic principles of DYMET technology // *Building on 100 Years of Success: proc. of the Intern. Thermal Spray Conf.* (Seattle, WA, USA). ASM International, 2006.
61. **Ключев О.Ф., Каширин А.И., Шкодкин А.В.** Технология газодинамического нанесения металлических покрытий. Ч. 1: Процесс формирования покрытий // *Сварщик*. 2003. № 4 (32). С. 25–27.
62. **Ключев О.Ф., Каширин А.И., Шкодкин А.В., Бuzдыгар Т.В.** Технология газодинамического нанесения металлических покрытий. Ч. 2: Применение покрытий // *Сварщик*. 2003. № 5 (33). С. 24–27.
63. **Ключев О.Ф., Каширин А.И., Шкодкин А.В., Бuzдыгар Т.В.** Технология газодинамического нанесения металлических покрытий. Ч. 3: Оборудование "ДИМЕТ" // *Сварщик*. 2003. № 6 (34). С. 25–27.
64. **Villafuerte J.** Cold Spray: A new technology // *Welding Journal*. 2005. Vol. 84. No. 5. P. 24–29.
65. **Maev R.Gr., Leshchinsky Ev.** Low pressure gas dynamic spray: shear localization during particle shock consolidation // *Building on 100 Years of Success: proc. of the Intern. Thermal Spray Conf.* (Seattle, WA, USA). ASM International, 2006.
66. **Weinert H., Maeva E., Leshchinsky V.** Low pressure gas dynamic spray forming near-net shape parts // *Building on 100 Years of Success: proc. of the Intern. Thermal Spray Conf.* (Seattle, WA, USA). ASM International, 2006.
67. **Kreye H., Gartner F., Schmidt T., Klassen T.** Cold spraying – from thermal spraying to kinetic spraying: proc. of the 7th Colloquium on HVOF Spraying (Erding, Germany). Gemeinschaft Thermisches Spritzen e.V., 2006.