

Газодинамическое напыление – технология наращивания металла без плавления

К.ф.-м.н. А.В. Шкодкин, к.ф.-м.н. А.И. Каширин, к.ф.-м.н. О.Ф.Клюев, Т.В. Буздыгар

Место ГДН в газотермических способах напыления покрытий

Газодинамическое напыление (ГДН) металлических покрытий является одним из методов нанесения покрытий потоком мелкодисперсных конденсированных частиц. Достаточно хорошо развитые технологии газотермического напыления покрытий основаны на нагреве и плавлении частиц, и ускорении их высокотемпературным газовым потоком. В зависимости от источников нагрева разработаны методы электродугового, газопламенного, детонационного и плазменного напыления, а также их версий с разными температурами и скоростями потока частиц. Общим свойством газотермических методов нанесения покрытий является то, что на поверхность основы напыляемый материал поступает в виде расплавленных частиц. На поверхности происходит кристаллизация и остывание частиц с образованием покрытия [1].

Принципиальной отличительной особенностью газодинамического метода нанесения покрытий является применение нерасплавленных металлических частиц и придание им высокой кинетической энергии вместо тепловой. Характерные диапазоны температур газа и скоростей частиц для разных методов напыления покрытий представлены на Рис.1.

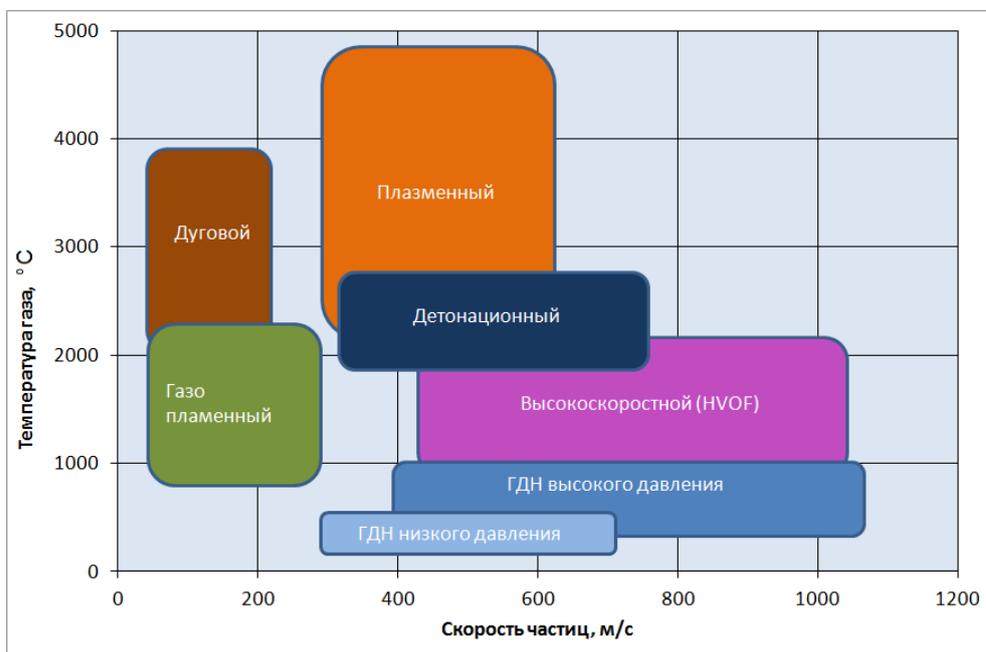


Рис.1. Характерные диапазоны температур газа и скоростей частиц при разных методах напыления покрытий.

Сущность газодинамического метода заключается в ускорении нерасплавленных металлических частиц сверхзвуковым потоком газа и обеспечении их высокой скорости при ударе о поверхность основы. При высокоскоростном ударе происходит пластическая деформация частиц и их закрепление на основе.

На начальном этапе изучения процесса закрепления частиц при высокоскоростном ударе для ускорения частиц применялся сжатый гелий или смесь гелия с воздухом при обычной температуре без подогрева газа. Закрепление частиц потоком газа без нагрева было названо «холодным» газодинамическим напылением [2]. Термин «холодное напыление» в англоязычной версии закрепился как Gas Dynamic Cold Spray или просто Cold Spray.

К **преимуществам** ГДН по сравнению с газотермическими способами напыления относятся все факторы, связанные с достаточно низкой температурой процесса.

В первую очередь это отсутствие сильного теплового воздействия на материал основы, то есть исключение возможных деформаций или разупрочнения материала основы.

Существенным является отсутствие окисления частиц и высокотемпературных химических реакций в частицах и в покрытии.

Вследствие достаточно низкой температуры процесса в покрытии не возникают растягивающие напряжения при остывании, что позволяет наносить покрытия любой толщины от десятков микрометров до десятков сантиметров.

Низкая пористость покрытий, наносимых ГДН, и отсутствие окисления частиц обеспечивают достаточно высокие теплопроводность и электропроводность материала покрытий.

К преимуществам процесса следует отнести отсутствие открытого пламени и горючих газов, что способствует повышению безопасности и снижению вредности процесса при выполнении работ по нанесению покрытий.

К **недостаткам** ГДН следует отнести существенное ограничение спектра наносимых материалов, что связано с самой физической сущностью процесса - необходимостью пластической деформации частиц при ударе. Хрупкие или очень твёрдые материалы не могут быть нанесены посредством ГДН, так как частицы либо разрушаются при ударе, не обеспечивая создания сплошного покрытия, либо отражаются от основы, не достигая пластической деформации, а вызывая эрозию основы. Ограничения накладываются и на допустимые материалы основы, которые должны быть достаточно твёрдыми и прочными, чтобы не разрушаться при высокоскоростном ударе как прессованные мел или графит, и не гасить скорость частиц при ударе как резины или полимеры.

Механизмы закрепления частиц при высокоскоростном ударе

Наиболее похожими технологическими процессами, связанными с возникновением прочной связи в зоне контакта при пластической деформации металла, являются сварка взрывом, соединение холодной прокаткой (Accumulative Roll Bonding - ARB) и холодная сварка давлением (Cold Pressure Welding). Все эти процессы основаны на стимулировании пластической деформации на границе двух металлических пластин путём приложения высокого давления без дополнительного нагрева для создания неразъёмного соединения.

Процессы, происходящие при столкновении металлических частиц с основой в методе газодинамического напыления, имеют ту же природу - пластическая деформация металла, разрушение оксидных плёнок и возникновение металлических связей, но отличаются масштабом, что может обуславливать как схожесть, так и отличия в механизме закрепления частиц.

Исследования механизма сцепления частиц с основой в процессе ГДН интенсивно проводились в течение последних двух десятилетий. Результаты этих исследований содержатся в десятках публикаций и обобщены в нескольких сборниках и монографиях [3 – 8]. В настоящее время предполагается несколько возможных механизмов закрепления частиц на основе – образование металлических (металлургических) связей, механическое зацепление и дисперсионное (электромагнитное) взаимодействие.

При ударе металлической частицы о поверхность металла при недостаточной для закрепления скорости происходит отскок частицы с отпечатком остаточной деформации на основе (Рис.2а).

При скорости, достаточной для закрепления частицы, названной критической скоростью, происходит сильная деформация частицы с возникновением вязкого течения материалов частицы и основы на границе их раздела и отскок частицы не происходит, а происходит её закрепление. Расчёты [9, 10] показали, что при достижении критической скорости может возникать адиабатическая сдвиговая неустойчивость (*adiabatic shear instability*), связанная с преобразованием части кинетической энергии в энергию тепловую в узкой локальной зоне контакта частицы и основы. В результате возникновения этой неустойчивости инициируется выдавливание материала на периферию зоны контакта частицы с основой. При таком выдавливании происходит разрушение окисных плёнок и образование металлических связей между частицей и основой. Появление тонкого следа выдавленного материала на периферии деформированной частицы, рассматривается как признак достижения критической скорости (Рис.2б).

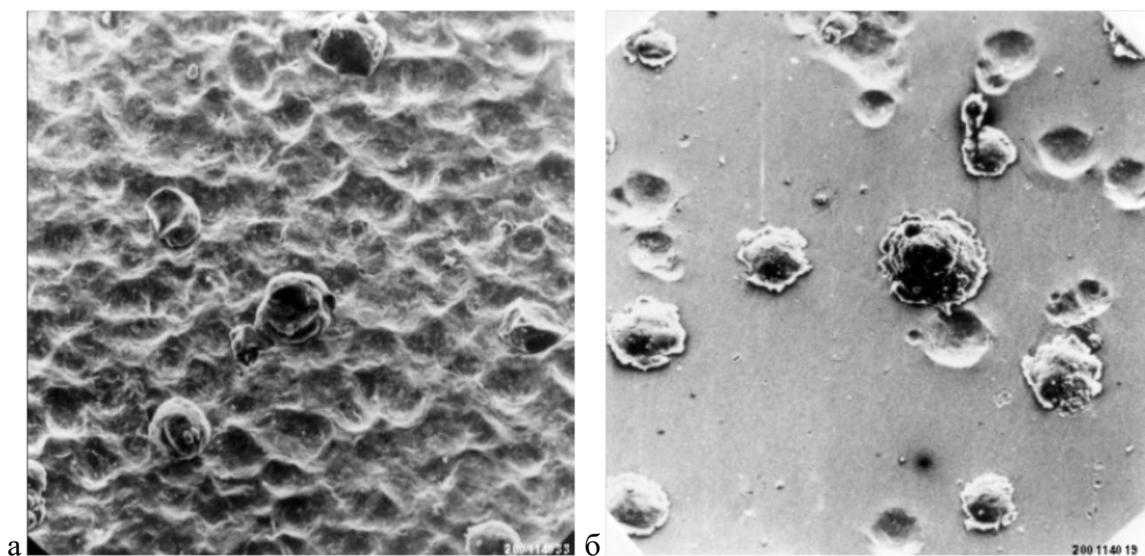


Рис.2. Закрепление частиц на поверхности основы при скоростях меньше критической (а) и больше критической (б) по [3].

Тонкий след выдавливания материала, однако, не всегда наблюдается при закреплении частиц. Тем не менее, применение модели адиабатической сдвиговой неустойчивости позволяет корректно связать необходимую для закрепления частиц скорость с такими характеристиками частиц и основы, как твёрдость, температура, теплопроводность и температура плавления материала при ударе.

Механическое зацепление частиц на основе предполагает возникновение неоднородностей при вязком течении на границе раздела частицы и основы, приводящих к заполнению микронеровностей поверхности основы или даже к механическому перемешиванию материалов частицы и основы.

Перемешивание на границе раздела иногда наблюдалось для некоторых сочетаний материалов частиц и основы [3, 5], однако в большинстве случаев оно не обнаруживается, а основа и покрытие имеют резкую изрезанную границу раздела с заполненными микронеровностями (Рис.3). Можно предполагать и одновременную реализацию описанных механизмов [11].

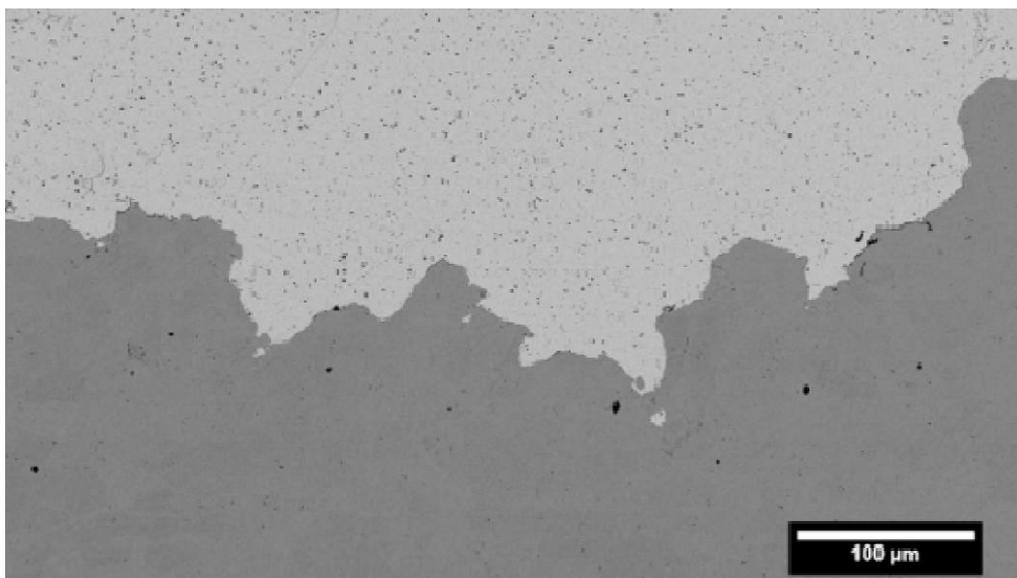


Рис.3. Граница раздела медного покрытия и стальной основы.

Известно, что при сближении поверхностей даже разнородных материалов до расстояний от одного до десятков нанометров происходит их взаимное притяжение под действием сил Ван-дер-Ваальса. Такое взаимодействие для макроскопических тел описывается как коллективное электромагнитное взаимодействие групп атомов конденсированной среды и называется дисперсионным взаимодействием. По сравнению с характерными энергиями химических связей энергия дисперсионного взаимодействия мала. Обычно это взаимодействие не наблюдается вследствие шероховатости поверхностей макроскопических тел. Сближение поверхностей, однако, может быть реализовано в результате пластической деформации одного или обоих контактирующих тел.

По теоретическим оценкам сила взаимодействия тел при сближении на расстояние менее одного нанометра может достигать 25 – 250 МПа [12]. Эта величина меньше достигаемой в ряде случаев при ГДН величины когезии, что указывает на доминирование иных связей при закреплении металлических частиц. Тем не менее, во многих случаях, а особенно в случаях закрепления металлических частиц на основе из стекла или керамики, когда величина адгезии металлических покрытий не превышает 10 - 30 МПа, дисперсионное взаимодействие, возможно, играет существенную роль.

Основным и характерным отличием покрытий, нанесенных методом газодинамического напыления, от покрытий, наносимых газотермическими способами,

является отсутствие диффузионной зоны на границе покрытия и основы, что обусловлено значительно меньшей величиной нагрева в области контакта и малым временем взаимодействия частиц с основой. Обычно на границе раздела основы и покрытия вплоть до десятых долей микрометра не наблюдается участка, где одновременно присутствуют как атомы основы, так и атомы покрытия (Рис.4).

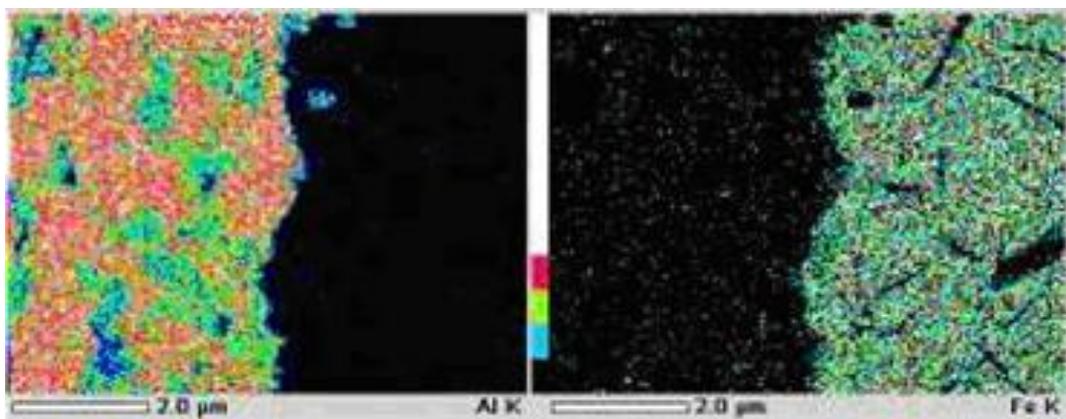


Рис.4. Граница раздела алюминиевого покрытия на основе из чугуна в характеристическом излучении алюминия (а) и железа (б).

Следует отметить, что физический процесс сцепления частиц с основой по существу не отличается от процесса сцепления частиц между собой при росте толщины покрытия. Отличие адгезии и когезии покрытий, создаваемых ГДН, сводится к изменению материала основы для ударяющейся с высокой скоростью частицы. Однако для объяснения результатов нанесения покрытий на очень твёрдую поверхность приходится предполагать различие механизмов сцепления частиц с основой (адгезии) и друг с другом (когезии) [13].

Ускоряющий газовый поток

Основной элемент процесса газодинамического напыления – ускорение частиц для обеспечения высокоскоростного удара частицы о преграду. Это ускорение производится потоком газа. Чем выше скорость потока, тем более высокую скорость можно придать разгоняемым частицам. Для создания высокоскоростного потока сжатый газ подают в сопло Лавала, в расширяющейся части которого формируется сверхзвуковой поток газа.

Типовое сопло Лавала (рис. 5) имеет входную сужающуюся часть, в которой скорость газа меньше скорости звука и расширяющуюся часть, в которой скорость газа превышает скорость звука. Между ними расположен участок сопла, называемый критическим сечением сопла (горлом сопла), в котором скорость газа равна локальной скорости звука.

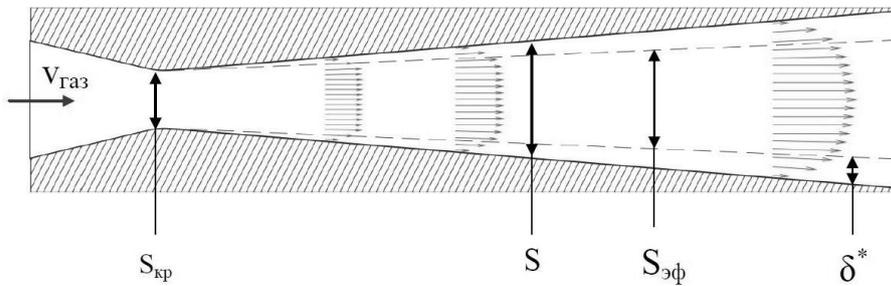


Рис. 5. Течение газа в сопле Лавая.

Адиабатическое течение идеального газа в соплах Лавая описывается известным выражением (1):

$$\frac{S_{кр}}{S} = \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{1}{k-1}} \lambda \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2\right)^{\frac{1}{k-1}}, \quad (1)$$

где $\lambda = V_{газ} / C_{кр}$, $V_{газ}$ – скорость газа, $C_{кр}$ – скорость звука в критическом сечении, $S_{кр}$ и S – площадь поперечного сечения сопла в критическом сечении (в горле) сопла и в точке на оси сопла, где определяется скорость газа, k – показатель адиабаты, отношение теплоемкости газа при постоянном давлении к теплоёмкости при постоянном объеме.

Однако в узких и протяженных соплах, характерных для газодинамического напыления, необходимо учитывать формирование пограничного слоя и торможение газового потока о стенки сопла [3]. В этом случае для расчета параметров газа в сопле вместо фактической площади поперечного сечения S используется эффективное сечение сопла $S_{эф}$, которое рассчитывается с учетом уменьшения поперечных размеров сопла на толщину вытеснения пограничного слоя δ^* (Рис.5).

Скорость звука $C_{кр}$ зависит от природных свойств конкретного газа, характеризующихся показателем адиабаты k и молярной массой μ , а также от температуры газа перед соплом T_0 .

$$C_{кр} = \sqrt{k \frac{p}{\rho}} = \sqrt{\frac{2k}{k+1} \frac{p_0}{\rho_0}} = \sqrt{\frac{2k}{k+1} \frac{R}{\mu} T_0}. \quad (2)$$

Здесь R – универсальная газовая постоянная.

Только одноатомные газы с малым удельным весом (малой молярной массой), такие как водород и гелий, позволяют достигать скорости потока более 900 м/с при обычных температурах уже в критическом сечении сопла. Для остальных газов, включая азот и обычный воздух, скорость звука при обычных температурах ниже более чем в два раза. По этой причине начальные исследования и попытки применения метода ГДН производились с гелием.

Для практического применения метода ГДН, необходимо обеспечить массовый расход газа, который мог бы разгонять хотя бы 10 – 100 граммов порошка в минуту. Для этого требуется массовый расход сжатого газа не менее 100 – 1000 граммов в минуту, иначе частицы начнут слишком сильно тормозить газ. В привычных терминах расхода газа для применения ГДН требуется приблизительно 0,3 – 3 куб.м азота или воздуха в минуту. Для более лёгкого гелия расход должен соответственно составлять 1,5 – 15 куб.м в минуту.

При столь больших необходимых расходах газа высокая стоимость гелия стимулировала применение более дешёвых сжатого воздуха или азота для ускорения частиц. Для достижения высокой скорости потока воздуха или азота используется вытекающая из соотношения (2) возможность увеличить скорость газа – повысить его температуру. В современных установках ГДН одним из основных параметров является нагрев газа до температур 100 – 1000 °С.

Массовый расход газа Q в сверхзвуковом сопле определяется критическим сечением сопла $S_{кр}$, и параметрами газа перед соплом - давлением p_0 и температурой T_0 заторможенного газа как

$$Q = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}} \sqrt{\frac{k\mu}{RT_0}} p_0 S_{кр} \quad (3)$$

Нагрев газа, ведущий к увеличению скорости потока, как видно из (3), вызывает и снижение его массового расхода. При обеспечении необходимого для эффективного ускорения частиц расхода газа требуется увеличение давления газа перед соплом (давления торможения).

Для придания высокой скорости металлическим частицам необходима высокая скорость газа. Однако в зависимости от размера, плотности и формы частиц их скорость в сверхзвуковом потоке будет значительно различаться и всегда оставаться меньше скорости газа. На Рис.4 приведены расчётные скорости газа и частиц меди размером 5 и 25 микрон, достигаемые при движении по оси сопла [14].

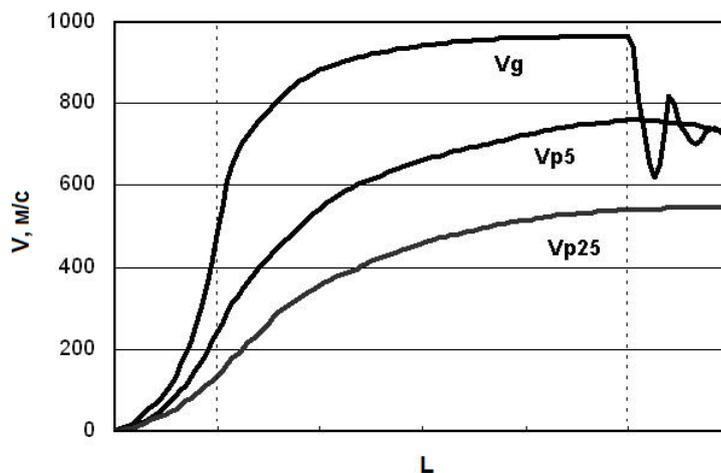


Рис.6. Характерное изменение значений скорости газа V_g и частиц меди размером 5 мкм V_{p5} и 25 мкм V_{p25} вдоль оси сопла при $P_0 = 25$ атм и $T_0 = 673$ °К. Пунктиром отмечены критическое и выходное сечения сопла.

Для достижения частицей высокой скорости необходимо обеспечить достаточное время нахождения её в ускоряющем потоке газа, что требует увеличения длины сверхзвуковой части сопла.

Однако допустимая длина сверхзвуковой части сопла ограничивается начальным давлением (давлением торможения) применяемого сжатого газа и потерями на трение газа о стенки сопла. Для сохранения скорости газа при наличии трения на каждом участке сопла требуется дополнительный перепад давления Δp . Так для течения газа с трением в канале постоянного диаметра d длиной L при скорости газа v требуется перепад давления

$$\Delta p = \zeta \frac{L}{d} \frac{\rho v^2}{2}, \quad (4)$$

где ζ - коэффициент торможения.

Поскольку давление газа на выходе из сопла в так называемом «расчетном» режиме всегда примерно постоянно и равно атмосферному, то чем больше исходное давление газа, тем больший перепад давления можно обеспечить на сверхзвуковом ускоряющем участке сопла и тем длиннее может быть этот участок.

Дополнительного увеличения длины сопла можно достигнуть, расширяя его к выходу так, чтобы давление в потоке газа было меньше атмосферного, т.е. искусственно увеличить перепад давления. Однако слишком сильное расширение сопла и наличие встречного (вектору скорости газа) градиента давления может вызвать появление внутри сопла скачков уплотнения, переводящих высокоскоростной сверхзвуковой поток в дозвуковое течение.

Разным параметрам газа соответствуют разные оптимальные конструкции сверхзвукового сопла. При этом неизменна общая тенденция – увеличение начальных давления и температуры газа позволяют обеспечить более эффективное ускорение частиц в сверхзвуковом сопле.

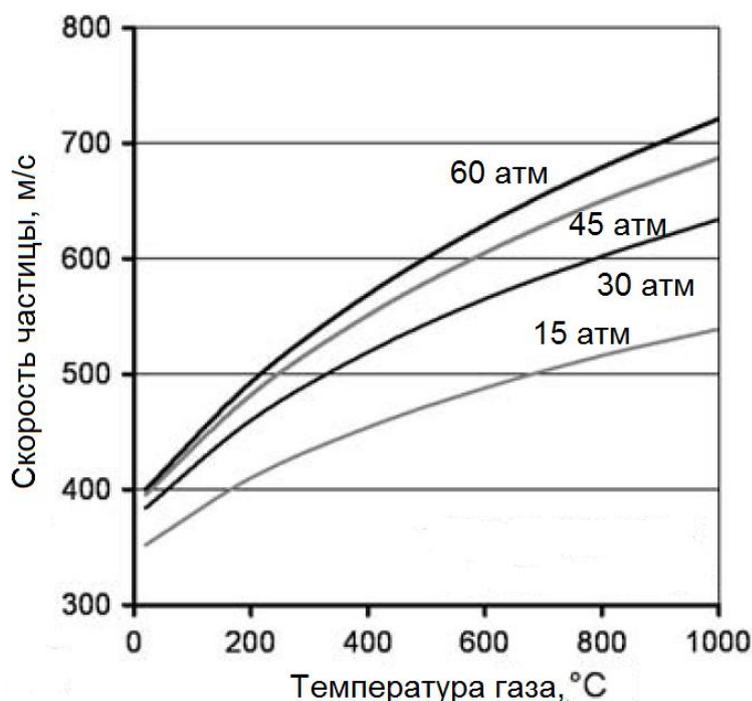


Рис.7. Влияние давления и температуры газа на скорость сферической медной частицы диаметром 25 микрон по [15].

Применяемое в современном оборудовании для газодинамического напыления давление сжатого газа составляет обычно от 5 до 50 атмосфер. При таких давлениях расход газа может достигать от 0,3 до 3 куб.м в минуту, а мощность, затрачиваемая на подогрев газа от 3 до 50 кВт.

Свойства ускоряемых частиц

В газовом потоке ускорение частицы массой m связано с коэффициентом аэродинамического сопротивления частицы C_D , площадью эффективного сечения частицы

A_p , плотностью ускоряющего газа $\rho_{газ}$, и разностью скоростей газового потока $v_{газ}$ и частицы v как

$$m \frac{dv}{dt} = \frac{1}{2} C_D A_p \rho_{газ} (v_{газ} - v) |v_{газ} - v|, \quad (5)$$

Кроме параметров газа, на эффективность ускорения частиц влияют главным образом их размер, форма и плотность. Чем крупнее и тяжелее частицы, тем медленнее они разгоняются потоком. Очень мелкие и лёгкие частицы быстро разгоняются, но также легко отклоняются от преграды при обтекании её потоком газа. Поэтому диапазон размеров применяемых для ГДН металлических частиц приходится ограничивать интервалом приблизительно 5 – 50 микрометров.

Так как в основе метода газодинамического напыления лежит необходимость пластической деформации частицы при ударе, то важным, ограничивающим возможности метода, параметром является твёрдость материала частицы.

Предложенная в [15] полуэмпирическая формула для определения критической скорости, учитывала такие свойства материала частицы как плотность ρ , температура плавления T_m и твёрдость σ_{uts} , а также температуру частицы в момент удара T_i .

$$V_{крит} = 667 - 0,014 \rho + 0,08 (T_m - 273) + 10^{-7} \sigma_{uts} - 0,4 (T_i - 273). \quad (6)$$

Нагрев газа влияет не только на скорость частиц, но и изменяет процесс их деформации при ударе. При одинаковой скорости частиц нагретый поток обеспечивает большую эффективность напыления (Рис.8). Это связано как с повышением температуры в контакте частицы и основы при ударе за счет роста температуры основы и частиц, так и с изменением пластичности нагретых частиц.

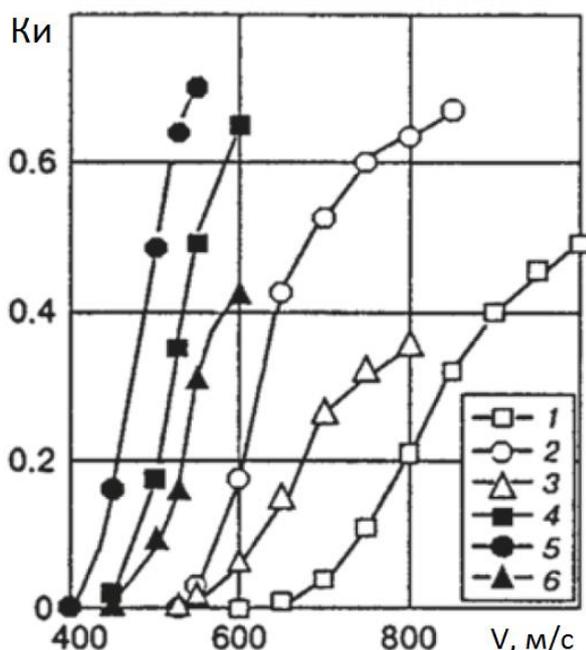


Рис.8. Эффективность закрепления частиц при ускорении гелием без нагрева (светлые) или горячим воздухом (тёмные) для алюминия (1), меди (2) и никеля (3) по [16].

В процессе ускорения газового потока его температура T в сверхзвуковой части сопла значительно снижается от начального значения (температуры торможения T_0). Для идеального газа без учёта влияния стенок сопла

$$\frac{T}{T_0} = 1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2, \quad (7)$$

При торможении потока газа на преграде восстанавливается его исходная температура торможения за вычетом потерь на теплообмен со стенками сопла.

На Рис.9 приведены расчётные значения температуры газа T_g в сверхзвуковом сопле и расчётные температуры частиц меди размером 5 мкм T_{p5} и 25 мкм T_{p25} вдоль оси сопла [14]. Введённые перед соплом частицы могут заметно нагреться на начальном участке сопла, а в сверхзвуковой части остывают медленнее газа.

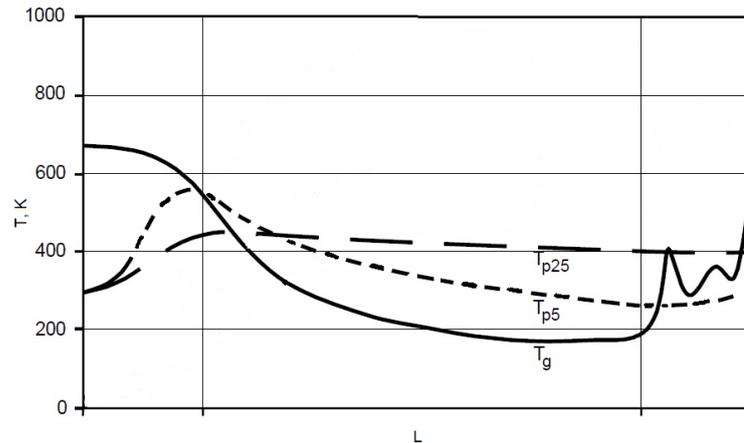


Рис.9. Расчётное изменение значений температуры газа T_g и частиц меди размером 5 мкм T_{p5} и 25 мкм T_{p25} вдоль оси сопла при $P_0 = 25$ атм и $T_0 = 673$ °К. Линиями отмечены критическое и выходное сечения сопла.

Снижение твёрдости частиц путём их предварительного нагрева используется в тех направлениях метода ГДН, которые применяют ввод частиц до критического сечения сопла. Для этого увеличиваются время нахождения частиц при высокой температуре торможения газа [15]. Однако длительный нагрев металлических частиц до температур 400 – 1000 °С увеличивает вероятность налипания частиц в горле сопла и исключает применение сжатого воздуха, содержащего кислород, из-за возможного окисления частиц. В таких вариантах ГДН используются только азот или гелий.

Свойства основы

Температура частицы, а также её теплопроводность и теплоёмкость влияют на развитие пластической деформации и возникновение вязкого течения в зоне контакта с основой при ударе. Неизбежно на этот процесс влияют и температура, теплоёмкость и теплопроводность основы. На Рис.10 приведено сравнение эффективности закрепления частиц алюминия на гладкой поверхности материалов с разной теплопроводностью - стекле, стали и алюминии при разных скоростях перемещения сопла вдоль поверхности основы.

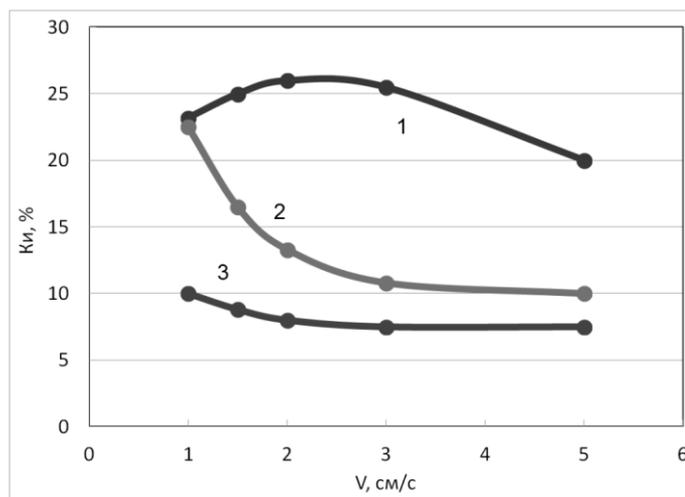


Рис.10. Эффективность напыления ($K_{и}$) алюминия на основу из стекла (1), стали (2) и алюминия (3) при разной скорости движения сопла по [18].

Частицы здесь вводились в поток после критического сечения сопла и испытывали минимальный нагрев, а тормозящийся на преграде поток ускоряющего газа нагревал основу непосредственно в зоне закрепления частиц. При одинаковой скорости движения сопла, то есть одинаковой длительности нагрева напыляемого участка, эффективность закрепления частиц падает с увеличением теплопроводности материала основы.

Нагрев поверхности основы в пятне напыления тем больше, чем выше температура потока натекающего газа и эффективность теплообмена между потоком и основой. Увеличение полного расхода газа при постоянной температуре газа и размере пятна напыления также приводит к росту температуры поверхности основы.

Сравнение температуры стальной основы в пятне напыления при использовании разных установок ГДН показали, что при одинаковой температуре торможения потока 500°C стационарный нагрев основы в пятне возрастает от 180°C для установок с низким давлением до 350°C для установок с высоким давлением [19].

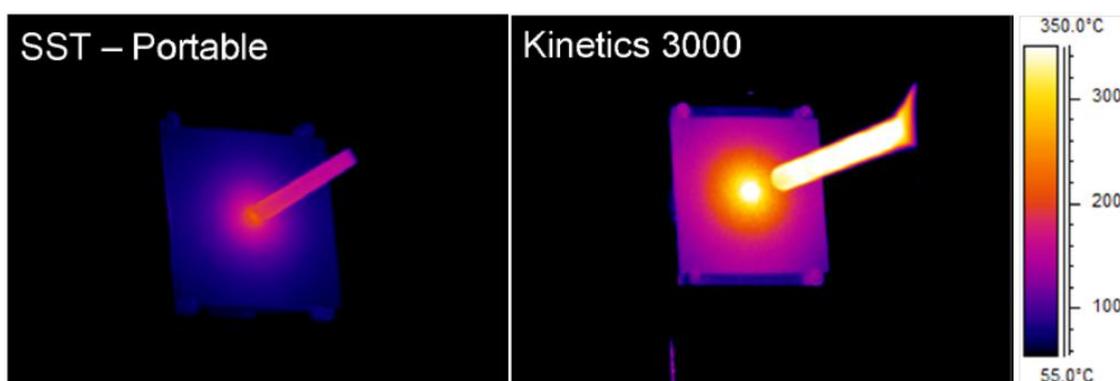


Рис.11. Температура стальной основы в пятне напыления для установок ГДН с давлением 6 атм (дистанция 1 см) и 35 атм (дистанция 4 см) при одинаковой температуре торможения газа 500°C по [19].

Из-за отличий в характеристиках теплообмена материал основы может заметно влиять на эффективность напыления, однако с ростом толщины покрытия влияние свойств основы может снижаться, так как основой для последующих слоев покрытия

становится сам материал покрытия. При толщине покрытия более 100 – 150 микрон роль в характеристиках теплообмена играет уже не материал основы, а материал покрытия [18]. Прекращение быстрого роста толщины покрытия после достижения толщины 100 – 200 микрон можно наблюдать при напылении алюминия на основу с низкой теплопроводностью, такую как стекло или керамика, особенно при низкой скорости и температуре потока.

Экспериментально установлено, что закрепление частиц при ударе о шероховатую поверхность основы происходит при гораздо меньшей скорости, чем при ударе о гладкую поверхность [20]. Это, возможно, связано с увеличением локального давления в точках контакта при ударе и уменьшением величины упругой силы разгрузки, инициирующей отскок частицы. Эффективность этого процесса определяется соотношением размера частиц и величины шероховатости поверхности. Нанесение тонких слоёв пластичных металлов на шероховатую поверхность возможно даже без нагрева потока и при сравнительно низкой скорости частиц. Но после закрепления первого слоя частиц покрытия поверхность становится более гладкой и закрепление частиц прекращается. Если на нанесенном слое снова создать шероховатость, то может закрепиться еще слой частиц, который сгладит созданную шероховатость.

Непрерывный процесс нанесения покрытия и создания на нём шероховатости реализован в методе газодинамического напыления, использующем низкие давления ускоряющего газа [21, 22]. В этом случае воздушным потоком ускоряется смесь металлических и керамических частиц. Керамические частицы обеспечивают создание на поверхности шероховатости, а металлические при закреплении формируют покрытие. В зависимости от соотношения долей керамических и металлических частиц в используемой порошковой смеси эффективность процесса существенно меняется (Рис.12).

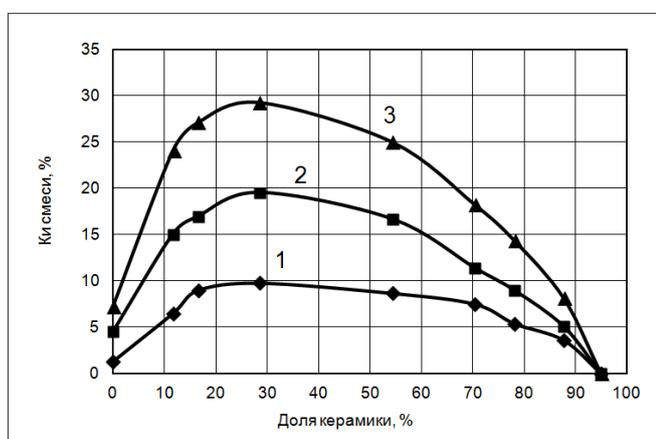


Рис.12. Зависимость эффективности напыления K_n от массовой доли керамической компоненты в смеси металлических и керамических частиц при разных температурах торможения газа (1 - 300 °C, 2 - 400 °C, 3 - 500 °C) по [19].

При этом методе нанесения только незначительная часть керамических частиц внедряется в покрытие (Рис.13). Большая часть керамических частиц при ударе лишь трамбуют и упрочняют поверхность, а затем отлетают под действием упругих сил.

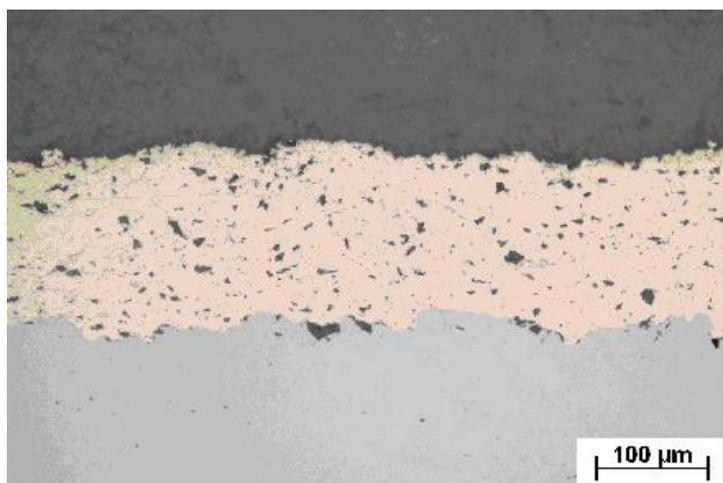


Рис.13. Поперечное сечение медного покрытия на стали. Объёмная доля внедрённых керамических частиц не превышает 5% при доле керамических частиц в исходной смеси 50 %.

Технологические параметры процесса

Кроме основных физических параметров, таких как давление и температура газа, характеристики частиц и основы, существенное влияние на процесс ГДН оказывают также технологические параметры процесса, а именно скорость перемещения сопла относительно поверхности основы, дистанция между выходным сечением сопла и поверхностью основы и угол между осью сопла и поверхностью основы.

Скорость перемещения сопла влияет на эффективность напыления, определяя величину нагрева основы потоком нагретого газа, как показано выше (Рис.10). Чем медленнее движется сопло относительно основы, тем выше температура в зоне закрепления частиц и выше эффективность напыления. Локальное повышение температуры на поверхности основы в основном ограничено участком, примерно совпадающим с выходным сечением сопла. В случае очень малой скорости движения сопла при напылении на детали небольших размеров возможно постепенное изменение эффективности напыления из-за нагрева всей детали потоком в ходе процесса напыления.

Дистанция между выходным сечением сопла и поверхностью основы определяется размером выходного сечения и полным расходом газа. При слишком малой дистанции возможно нарушение сверхзвукового течения внутри сопла из-за повышения давления на его выходе. При слишком большой дистанции происходит торможение частиц в области смешения потока с окружающим воздухом.

При отклонении потока от нормали к поверхности основы изменяется характер процесса закрепления частиц. Пластическая деформация частицы при ударе развивается под действием нормальной к поверхности основы компоненты скорости. При движении частицы под углом к поверхности появляется компонента скорости, которая способствует возникновению при ударе дополнительного сдвигового усилия, способствующего отскоку или отрыву частицы.

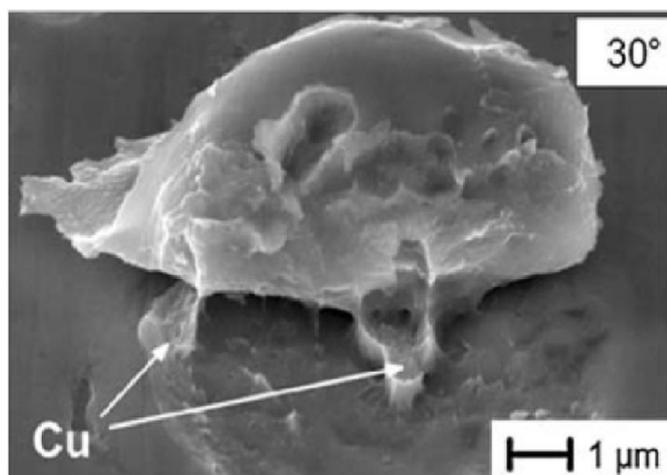


Рис.14. Частица меди, частично закрепившаяся при ударе под углом 30 градусов к поверхности основы по [15].

Изменение характера процесса закрепления частиц может приводить к значительному снижению эффективности напыления. Отклонение оси потока на 20 – 30 градусов от нормали к поверхности может приводить к снижению эффективности напыления в несколько раз (Рис.15).

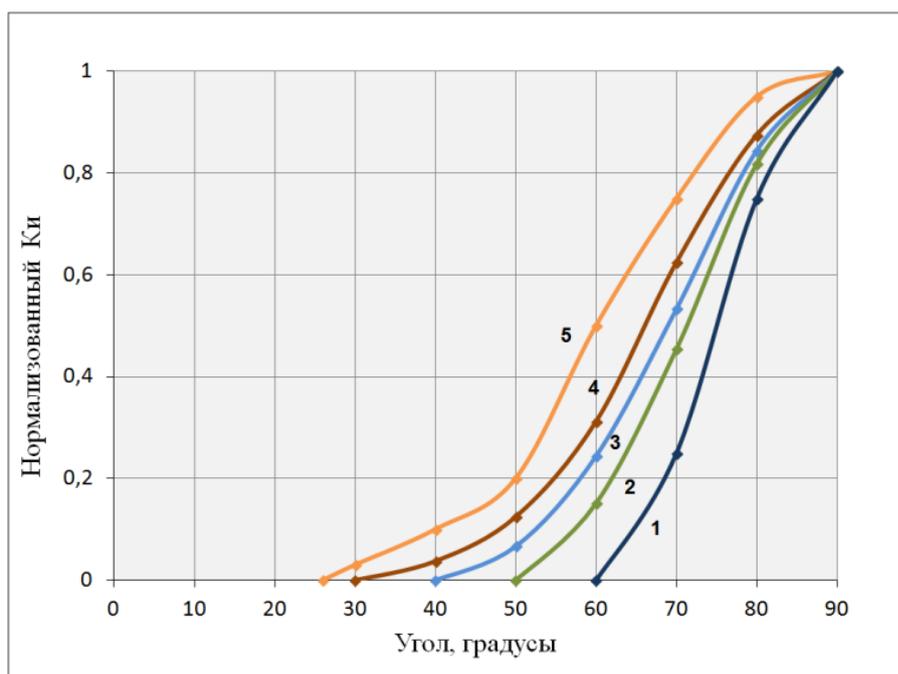


Рис.15. Нормализованная зависимость эффективности напыления меди от угла между потоком и поверхностью алюминиевой основы при разных температурах торможения (1 – 200°C, 2 – 300°C, 3 – 400°C, 4 – 500°C, 5 – 600°C) по [23].

Свойства покрытий

Все описанные выше физические процессы, происходящие при ускорении частиц и их ударе о поверхность основы, при создании реальных покрытий имеют статистический характер их реализации. В любом сопле присутствует распределение скорости газа по сечению сопла, любой порошок имеет распределение частиц по размеру, в пятне напыления всегда присутствует неоднородность распределения температуры поверхности

основы. Совокупность всех этих распределений является причиной плавного изменения эффективности напыления и свойств покрытий при изменении параметров процесса.

Адгезия

Обычно значения величины прочности сцепления (адгезии) покрытий, наносимых методом ГДН, составляют от 10 до 80 МПа, в зависимости от величины деформации частиц и основы. Величина деформации определяется скоростью частиц, а также твёрдостью, температурой и теплопроводностью частиц и основы. Для одного и того же материала покрытия чем выше твёрдость основы, тем ниже достигаемые величины адгезии. В некоторых случаях, особенно при использовании гелия с давлением торможения больше 30 атмосфер и применении температуры до 1000°С, для одинаковых материалов покрытия и основы удаётся достигать величины адгезии более 200 МПа и даже до 400 МПа [24].

Покрытия малой толщины, до 50 – 100 микрометров, как правило, имеют большую величину адгезии, чем толстые покрытия. Это связано с появлением внутренних напряжений при росте толщины покрытия. Так прочность сцепления покрытия алюминия с основой из стали, составляющая более 60 МПа при толщине менее 50 микрометров, может снизиться до 30 МПа при толщине более 2 – 5 миллиметров. Для обеспечения величины адгезии при любой толщине покрытий не менее 40 – 45 МПа поверхность основы из твёрдых материалов предварительно обрабатывается потоком абразивных частиц для создания шероховатости.

Следует отметить, что при нанесении покрытия под углом к поверхности основы, адгезия снижается так же значительно, как и эффективность напыления [8].

Когезия

Прочность покрытия на разрыв, то есть величина когезии – силы сцепления частиц в покрытии между собой, в принципе, соизмерима с величиной адгезии, так как в процессе напыления уже закрепившиеся деформированные частицы становятся основой для последующих ударяющихся частиц. В достаточно широком диапазоне изменения скорости и температуры частиц прочность покрытий на разрыв составляет 30 – 60 МПа.

Заметное увеличение прочности покрытия на разрыв (величины когезии) возможно тогда, когда количество добавляемых в покрытие частиц с малой степенью деформации существенно снижается. Это наблюдалось при росте эффективности закрепления частиц выше 80-85 % в результате увеличения давления газа и температуры газа и частиц [10].

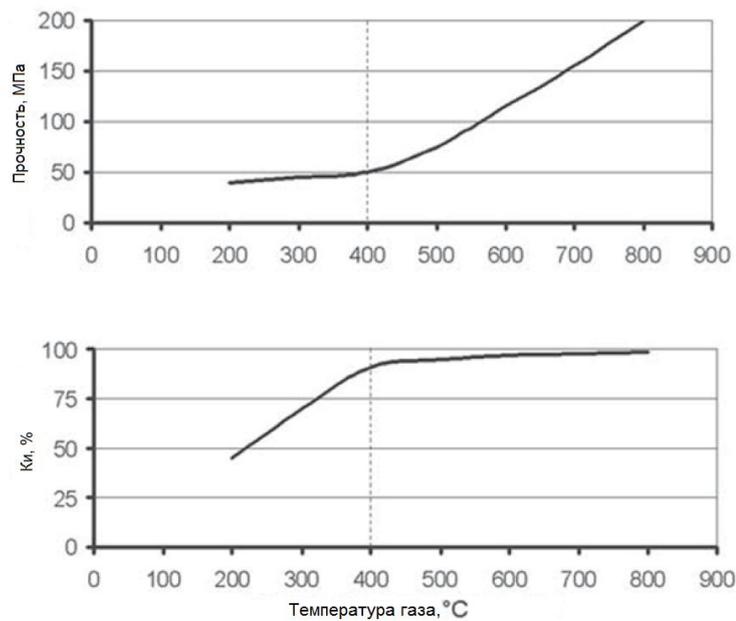


Рис.16. Прочность покрытия на разрыв и эффективность напыления медного покрытия при изменении температуры торможения сжатого азота с давлением 30 атмосфер по [10].

При использовании для напыления смесей металлических и керамических частиц увеличение когезии наоборот, происходит при снижении температуры и скорости потока. Это связано с тем, что керамические частицы при ударе увеличивают деформацию закрепившихся металлических частиц и чем меньше металлических частиц закрепляется на основе, тем большей деформации они подвергаются при неизменном составе порошковой смеси. Увеличивая долю керамических частиц в порошке, можно увеличивать и адгезию и когезию покрытия. При повышении доли керамических частиц возрастает и эффективность закрепления металлических частиц из исходной смеси, но при этом общая эффективность напыления смеси снижается (Рис.12 и Рис.17).

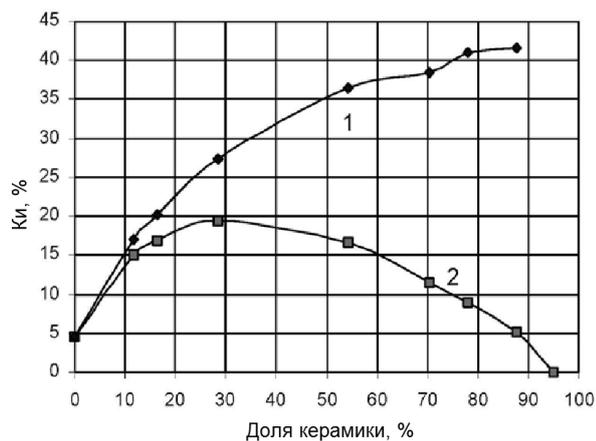


Рис.17. Эффективность использования металлического компонента (1) и общая эффективность напыления смеси (2) в зависимости от соотношения частиц алюминия и корунда в порошковой смеси по [20].

Пористость

Низкая пористость покрытий, наносимых методом ГДН, является его преимуществом перед многими газотермическими методами нанесения покрытий.

Обычно пористость покрытий составляет 1 – 5 % и в значительной мере определяется степенью деформации частиц. Как и в случае с когезией, для снижения пористости, то есть повышения степени деформации частиц и, соответственно, плотности покрытия, при напылении чистых металлических порошков требуется увеличивать скорость и нагрев газа и частиц, а при напылении смесей металлических и керамических частиц следует снижать нагрев газа и эффективность напыления.

Твёрдость

При нанесении металлических покрытий методом ГДН происходит деформация частиц, что сопровождается искажением кристаллической решётки материала. Для любых металлов с увеличением степени деформации свойства, характеризующие сопротивление деформации (прочность, твёрдость) повышаются, а пластичность уменьшается, происходит наклеп материала покрытия. Упрочнение материалов наклёпом обычно приводит к повышению их твёрдости на 30 – 40%. Именно такое увеличение твёрдости характерно для покрытий, по сравнению с соответствующим литым материалом.

Относительное удлинение

Наклёп частиц, снижающий их пластичность после закрепления, и отсутствие диффузионных процессов, размывающих границы между плотно упакованными частицами, приводят к высокой хрупкости материала покрытий, создаваемых методом ГДН.

Относительное удлинение покрытий из любых материалов составляет менее 1%. Это существенно влияет на требование к условиям эксплуатации и механической обработки покрытий. Деформация и удары, приводящие к деформации, могут вызвать возникновение трещин в покрытии.

Единственный способ увеличения пластичности материала покрытия – его термическая обработка. За счёт диффузионных процессов, интенсифицирующихся при нагреве, происходит изменение структуры частиц и рассасывание границ между частицами. При термообработке возможно значительное увеличение относительного удлинения материала покрытия.

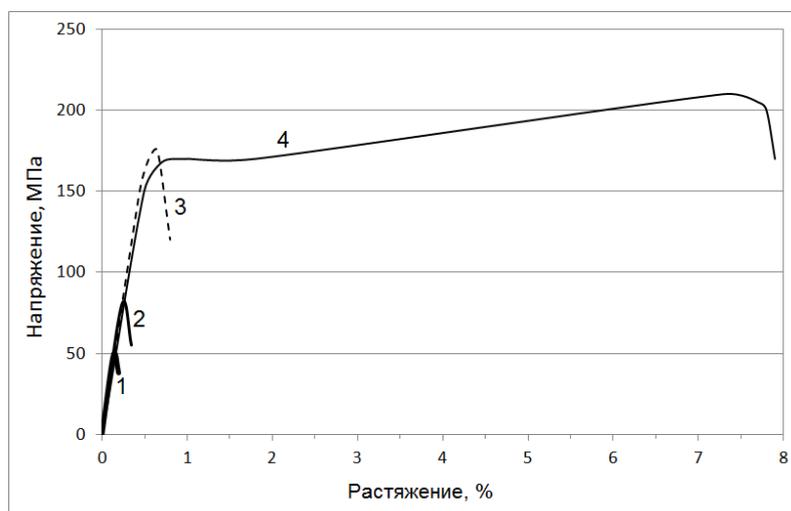


Рис.18. Кривая нагружения материала медного покрытия после напыления (1) и после отжига при 200 °C (2), при 400 °C (3) и при 600 °C (4) по [25].

Внутренние напряжения

Наклёп материала всегда приводит к возникновению остаточных напряжений сжатия. Такие напряжения характерны для покрытий, наносимых ГДН, в результате сильной деформации частиц. Величина остаточных напряжений зависит от исходной твёрдости частиц и материала основы. С увеличением твёрдости они обычно возрастают.

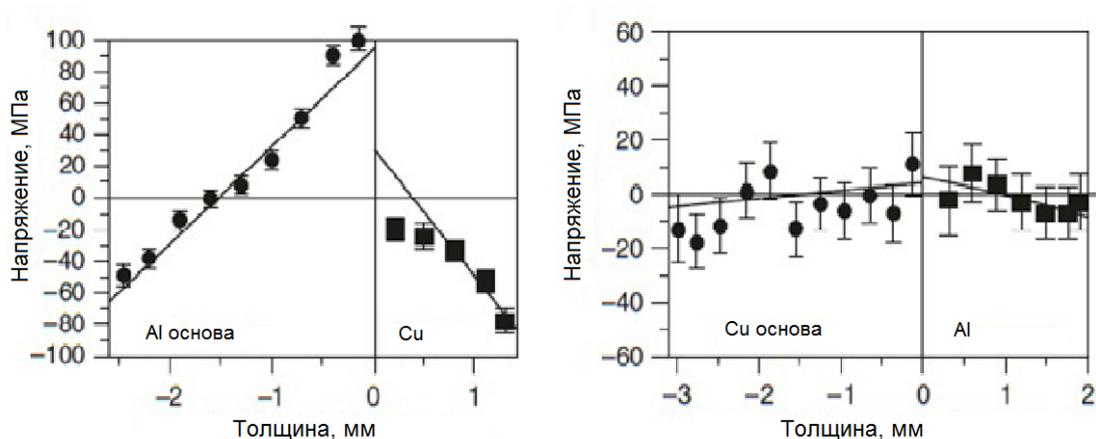


Рис.19. Остаточные напряжения в медном покрытии на алюминиевой основе и в алюминиевом покрытии на медной основе по [26]. Отрицательные значения в данном случае соответствуют напряжениям сжатия.

Остаточные напряжения препятствуют возможности создания покрытий из меди или никеля на твёрдой полированной керамической основе. Для создания таких покрытий применяется нанесение на керамическую основу тонкого подслоя алюминия, в котором остаточные напряжения имеют меньшую величину [27].

Высокая температура рабочего газа может приводить к нагреву покрытия. Если остывание более горячего, чем основа, слоя покрытия при газотермическом напылении всегда вызывает возникновение в покрытиях растягивающих напряжений, то при газодинамическом напылении это может обеспечить уменьшение сжимающих напряжений.

Износостойкость

Так как в основе процесса ГДН лежит использование пластической деформации нерасплавленных частиц, наносимые покрытия в основном являются сравнительно мягкими. Их обычно не применяют для повышения твёрдости или износостойкости поверхности деталей. Тем не менее, возможность нанесения покрытия на поверхности любых материалов без влияния на свойства основы стимулирует исследования по применению ГДН для изменения коэффициента трения деталей [7].

Электропроводность

Низкая пористость покрытий и отсутствие окисления частиц способствует повышению электропроводности покрытий, создаваемых ГДН, по сравнению с газотермическими покрытиями. На Рис.20 приведено сравнение проводимости медных покрытий, нанесенных газодинамическим, высокоскоростным (HVOF) и дуговым напылением.

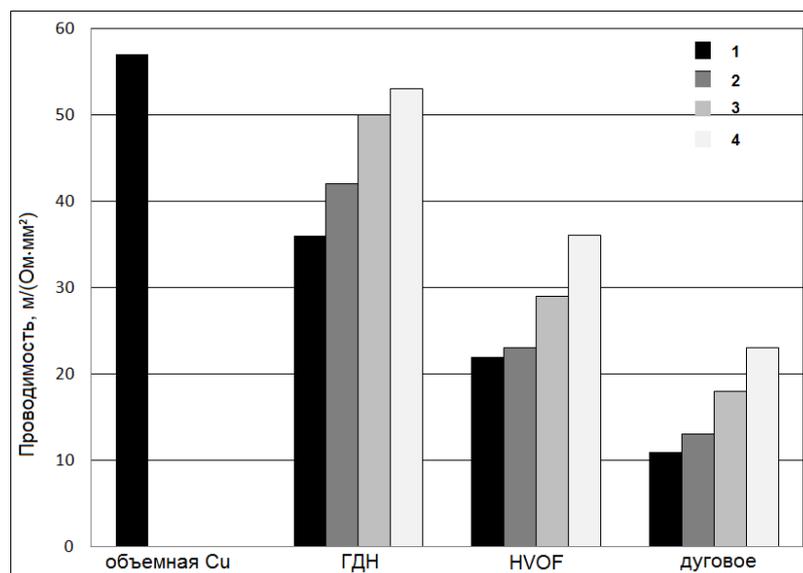


Рис.20. Электропроводность объемной отожжённой меди и медных покрытий, нанесенных газодинамическим, высокоскоростным (HVOF) и дуговым напылением (1) и этих покрытий после термообработки при 200°C (2), 400°C (3) и 600°C (4) по [28].

Так как пластическая деформация частиц при газодинамическом напылении приводит к деформации структуры наносимого материала (наклёпу), проводимость покрытий соответствует скорее проводимости нагартованной меди. Для повышения электропроводности нагартованной меди производят её отжиг. Как и в случае с относительным удлинением покрытий (Рис.17) последующая термообработка может существенно изменить свойства напылённого материала и обеспечить рост электропроводности (Рис.20), вплоть до 80–90 % от величины электропроводности отожжённой объёмной меди [6].

Коррозионная стойкость

С точки зрения коррозионной стойкости использование покрытий, создаваемых ГДН, не отличается от аналогичного применения покрытий, наносимых самыми разными способами. В первую очередь это создание катодной защиты стали покрытиями алюминия и цинка, обладающими высоким электродным потенциалом относительно стали. Нанесение меди, никеля и других металлов с более низким потенциалом, может использоваться для прямой защиты поверхности деталей от воздействия внешней среды вследствие их низкой пористости и, соответственно, непроницаемости [7, 29, 30].

Принципы построения оборудования

Использование изложенных выше принципов ускорения и закрепления частиц для создания металлических покрытий позволило обеспечить формирование основных технических подходов к реализации методов ГДН. В процессе развития они претерпели множество изменений [31]. В настоящее время основные принципы технологии газодинамического напыления металлических покрытий развиваются в двух направлениях.

Первое, основу которого заложили исследования ИТПМ (Новосибирск, Россия), направлено на достижение максимальной эффективности напыления и расширение

возможного спектра наносимых материалов за счёт повышения энергетики процесса [2, 3]. В мировой практике это направление называется ГДН высокого давления (High Pressure Cold Spray или HPCS).

Второе направление, развитие которого начали разработки ОЦПН (Обнинск, Россия), ориентировано на возможность широкого практического применения метода, что исключает использование дорогостоящих газов высокого давления и требует простоты конструкции и низких эксплуатационных расходов оборудования. Это направление имеет название ГДН низкого давления (Low Pressure Cold Spray или LPCS).

Сравнительные параметры оборудования для двух направлений приведены по [8] в Таблице 1.

Таблица 1.

Параметр	<u>ГДН высокого давления</u>	<u>ГДН низкого давления</u>
Рабочий газ	азот, гелий	воздух
Давление (атмосфер)	20 - 50	5 - 10
Температура нагрева газа, °С	до 1000	до 650
Расход газа, м ³ /мин	до 2,5 (азот), до 4,2 (гелий)	0,3 – 0,4
Подача порошка, кг/час	4,5 – 13,5	0,6 - 3
Дистанция напыления, мм	10 - 50	5 - 15
Электрическая мощность, кВт	17 – 47	3-4
Размер частиц, мкм	5 - 50	5 - 30

На Рис.21 приведены типичные схемы оборудования ГДН высокого давления и ГДН низкого давления. Кроме разных энергетических параметров оборудование отличается подходом к способу введения в поток частиц порошков.

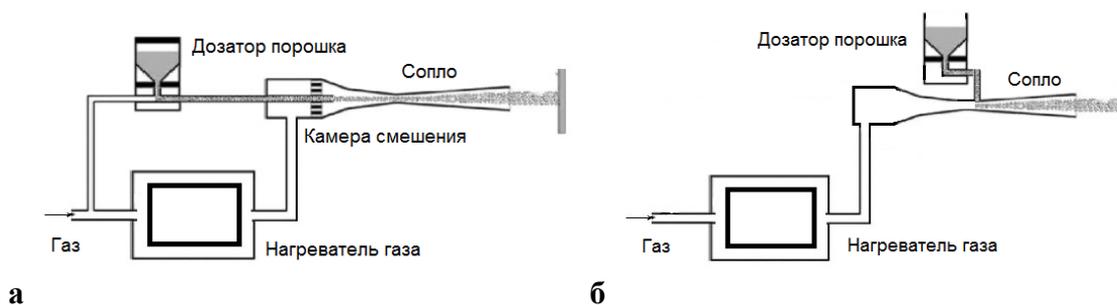


Рис.21. Схемы оборудования ГДН высокого давления (а) и ГДН низкого давления (б).

В ГДН высокого давления используются газы при давлении 20–50 атмосфер, а порошок вводится в камеру смешения, расположенную перед соплом.

Высокое давление газа дает возможность более эффективно ускорять частицы рабочего порошка. Введение порошка в поток до критического сечения сопла позволяет обеспечить более протяженный участок для ускорения частиц и их предварительного нагрева. При этом можно использовать более крупные размеры частиц, имеющие большую теплоемкость, которая способствует повышению температуры частиц во время удара. Нагрев частиц позволяет несколько повысить их пластичность даже для достаточно твердых материалов, таких как тантал или инконель. При таком вводе в поток частицы попадают в сверхзвуковую часть сопла на оси потока, что позволяет им достигать большей скорости.

Однако применение газов с высоким давлением и ввод порошка до критического сечения сопла порождают серьезные проблемы для технической реализации и применения метода ГДН высокого давления.

Затраты на расходуемый сжатый азот или гелий с давлением более 50 атмосфер при его потреблении 1–2 куб.м/мин, а также на транспортировку необходимого его количества в баллонах оказываются весьма значительны. Необходимость применения нагревателей газа мощностью 30–50 кВт делает конструкцию оборудования достаточно сложной и габаритной. Для подачи порошка необходимо использовать высокопрочные герметичные порошковые питатели с принудительным наддувом высоким давлением. Повышение пластичности частиц, происходящее при их нагреве во время движения в горячем газе до критического сечения сопла, может приводить к их налипанию на стенки на сужающемся участке дозвукового потока и в критическом сечении. Это требует точного выбора и ограничения температуры для разных типов металлических порошков и применения специальных материалов для изготовления входной и критической частей сверхзвукового сопла. При малой пластичности частиц или использовании смесей частиц с разной твердостью может происходить изнашивание критического сечения сопла, приводящее к изменению его рабочих параметров.

В ГДН низкого давления используется сжатый воздух давлением 5–10 атмосфер, а порошок вводится в поток после критического сечения сопла.

При потреблении сжатого воздуха 0,3–0,4 куб.м/мин обеспечить работу оборудования ГДН низкого давления может обычный компрессор мощностью 3–5 кВт. Ввод порошка в поток после критического сечения сопла исключает износ или забивание критического сечения сопла. Специальный профиль сопла и выбор точки ввода порошка в сопло на участке потока с давлением ниже атмосферного исключает требования к герметичности порошковых питателей, что удешевляет оборудование и упрощает работу с ним.

Снижение рабочего давления газа и упрощение технического устройства в ГДН низкого давления обуславливает и его недостатки. Низкое давление газа ограничивает достигаемые скорости напыляемых частиц. Малое время нахождения частиц в сверхзвуковом потоке (десятые доли миллисекунды) и пониженная температура газа на сверхзвуковом участке сопла ограничивают возможность нагрева частиц и, соответственно, возможность их размягчения.

Применение в ГДН низкого давления смесей металлических и керамических частиц [32] в значительной степени компенсирует снижение скорости и температуры частиц. Кроме обеспечения шероховатости поверхности растущего покрытия и уплотнения

упаковки закрепившихся частиц, керамические частицы очищают поверхность основы от загрязнений и окислов и препятствуют осаждению частиц на стенках сопла.

Однако спектр возможных для нанесения материалов и эффективность напыления по сравнению с ГДН высокого давления, остаются ограниченными.

Промышленное оборудование ГДН

К настоящему времени в мире выпущено около двух сотен установок ГДН высокого давления и более двух тысяч установок ГДН низкого давления. Основное количество первых произведено в Германии (компания “CGT” и её продолжатель “Impact Innovations”) и в Японии (компания “Plasma Giken”) (Рис.22). Оборудование для ГДН низкого давления выпускается в основном в России (компания «ОЦПН») и в Канаде (подразделение “SST” компании “CenterLine”) (Рис.23).



Рис.22. Оборудование ГДН высокого давления “Impact Innovations” (а) и “Plasma Giken” (б).



Рис.23. Оборудование ГДН низкого давления «ДИМЕТ» (ОЦПН) (а) и “SST” (CenterLine) (б).

Различия в технических решениях методов ГДН высокого давления и ГДН низкого давления привели к существенным отличиям в возможностях и способах применения оборудования.

Оборудование ГДН высокого давления, ориентированное на обеспечение возможности наносить покрытия с высокой эффективностью, достигающей 80-90 %, и высокой производительностью до 20 кг/час, а также повышенной прочностью до 200 МПа и более, требует стационарного размещения с хорошей звукоизоляцией и обязательной автоматизации процесса.

Кроме необходимости стационарного размещения, оборудование ГДН высокого давления потребляет значительную мощность для нагрева газа и требует большого расхода сжатого азота или гелия. При практическом использовании основные преимущества метода достигаются при расходе до 1 кг сжатого выше 50 атмосфер газа в минуту, что, даже не учитывая затрат на выход установки на рабочий режим, требует не менее четырех стандартных баллонов азота в час. Большой расход сжатого газа при продолжительной работе является одной из основных проблем для ГДН высокого давления.

Современное оборудование ГДН высокого давления по энергетике и условиям применения приближается к оборудованию для детонационного и высокоскоростного (HVOF) напыления, выигрывая в качестве покрытий для более пластичных материалов, но проигрывая в возможности нанесения более твёрдых материалов.

Высокая стоимость оборудования и большие затраты при его эксплуатации предполагают его использование только крупными специализированными предприятиями для обработки крупных специальных деталей или быстрого нанесения покрытий большой массы.

Оборудование ГДН низкого давления разрабатывалось для широкого практического применения метода в различных областях техники. Этому удалось достичь за счёт снижения энергоёмкости и уменьшения требований к процессу, хотя при этом потребовалась разработка и оптимизация специальных смесей порошков металла и керамики. Использование сжатого воздуха с давлением 5–10 атмосфер, ограничение температуры нагрева газа, применение негерметичных порошковых питателей позволило снизить стоимость оборудования и затрат при его использовании.

Снижение энергоёмкости и упрощение процесса приводят к ограничению как эффективности использования порошкового материала до 20–40 %, так и производительности нанесения покрытия - менее 1 кг/час. Используемые при напылении смеси металлических и керамических частиц включают в настоящее время только достаточно пластичные металлы – никель, медь, алюминий, цинк, свинец и олово.

Вместе с тем снижение энергоёмкости позволило создать компактное портативное оборудование, позволяющее реализовать метод ГДН и в заводских и в полевых условиях. Процесс нанесения покрытия при этом зачастую не требует предварительной подготовки поверхности, а использование недорогих сменных элементов сопла позволяет обеспечить большой рабочий ресурс оборудования.

Применение

В отличие от научных исследований направленных на создание новых более твёрдых и прочных покрытий за счет повышения энергетики процесса, практическое

применение оборудования ГДН, наоборот, направлено на снижение затрат и упрощение технологических процессов при производстве и ремонте продукции.

Оборудование ГДН высокого давления обеспечивает заметную выгоду при нанесении толстых покрытий на крупные детали или нанесении покрытий сравнительно большой массы. Оно успешно применено для нанесения толстых покрытий на валы для полиграфии, для изготовления мишеней для магнетронного распыления. Нанесение локальных покрытий с небольшой толщиной таким оборудованием становится менее рационально, но позволяет применять его при большом потоке продукции. Повышение энергетики потока и, следовательно, увеличение затрат приводит ГДН высокого давления к конкуренции с такими эффективными газотермическими способами нанесения покрытий, как детонационный и высокоскоростной (HVOF), которым он заметно проигрывает.

Практическое применение оборудования ГДН низкого давления обычно ограничено созданием локальных покрытий. Это обусловлено небольшой производительностью, которая напрямую зависит от расхода сжатого воздуха. Тем не менее, именно малый расход воздуха в сочетании с использованием порошковых смесей металл-керамика обеспечивает возможность успешного использования оборудования ГДН низкого давления в производстве и в ремонте в различных областях техники.

Электротехника

Высокая адгезия покрытий, отсутствие окислов и простота нанесения на локальные участки деталей из любого металла позволила применять ГДН для создания или защиты контактных площадок в электротехническом производстве. Контактный участок перехода с медного на алюминиевый провод, подвергающийся коррозии при длительной эксплуатации, модифицируется путём напыления меди на алюминиевый кабельный наконечник или алюминия на медный (Рис.24). Подготовка или очистка поверхности при этом не требуется, так как загрязнения и окислы удаляются в процессе нанесения покрытия. Защита от окисления и уменьшение переходного сопротивления контактных площадок крупногабаритных медных или алюминиевых шин выполняется также нанесением олова или его сплавов, или нанесением никеля.

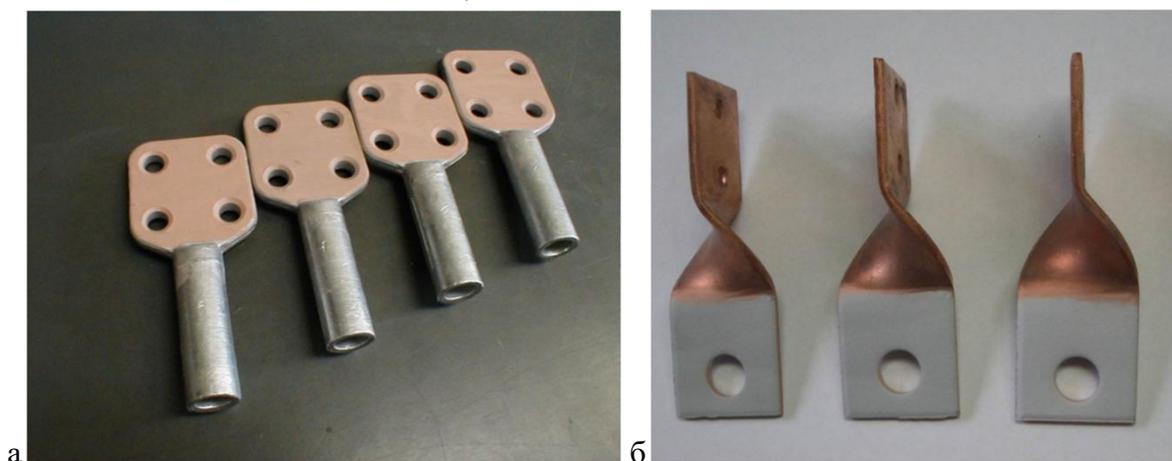


Рис.24. Алюминиевые кабельные наконечники с напылённой медной контактной площадкой (а) и медные переходники с оловянным защитным покрытием (б).

С помощью ГДН возможно оперативное нанесение многослойных покрытий, например алюминий–никель–медь–олово для предотвращения диффузионных эффектов на контактных площадках специального электрооборудования. Создание многослойных покрытий становится необходимым при нанесении контактных площадок на твёрдые материалы для повышения адгезии. Так на керамике или стекле для снижения влияния остаточных напряжений сжатия наносится подслоя алюминия, а затем слой меди (Рис.25).

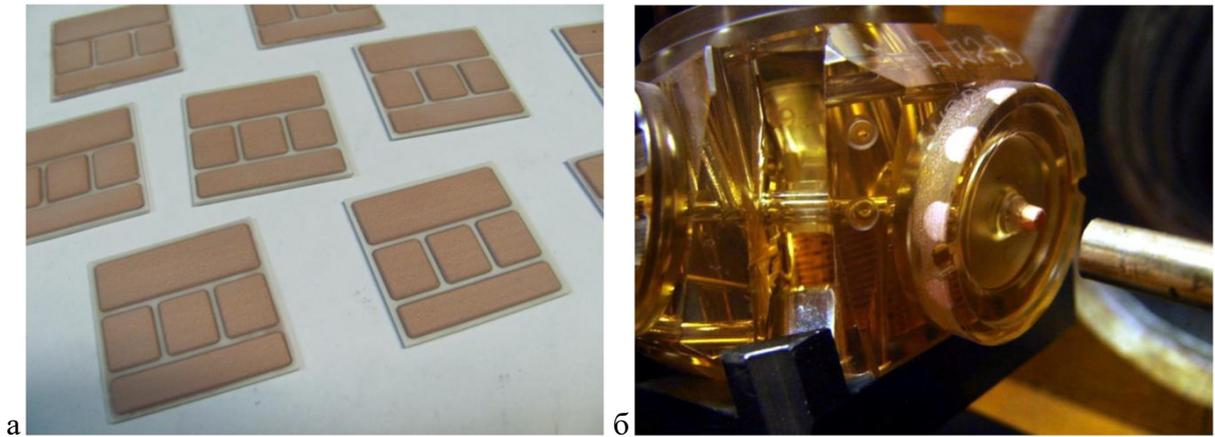


Рис.25. Контактные площадки на керамике (а) и на сапфире (б).

При нанесении контактных шин на электрообогревные стекла с прозрачным проводящим покрытием для предотвращения эрозии поверхности используются не смеси порошков металла и керамики, а смеси порошков металлов с разной теплопроводностью.



Рис.26. Нанесение контактных шин на электрообогревные стекла.

Нанесение двухслойных покрытий применяется и в производстве герметичных корпусов из титана или алюминия для специальной электронной аппаратуры. Нанесение подслоя меди и слоя олова на края корпуса и крышки позволяет обеспечить герметизацию пайкой без применения трудноудаляемых флюсов.

Защита от коррозии

Существующие методы защиты от коррозии хорошо развиты и широко применяются. Гальванические покрытия эффективно и производительно наносятся на мелкие изделия, горячее цинкование обеспечивает антикоррозионные свойства крупным деталям, электродуговое и высокоскоростное напыление эффективны для обработки крупных конструкций. Тем не менее, метод ГДН оказывается востребованным и для нанесения защитных покрытий.

Проблемы нанесения металлических покрытий на спечённые магниты, которые в гальванических ваннах пропитываются трудно удаляемыми солями и могут допустить только незначительный нагрев, достаточно просто решаются газодинамическим напылением. Нанесение локального защитного покрытия только на ограниченные небольшие участки поверхности детали может представлять проблему в гальванике, но удобно при использовании ГДН (Рис.27).

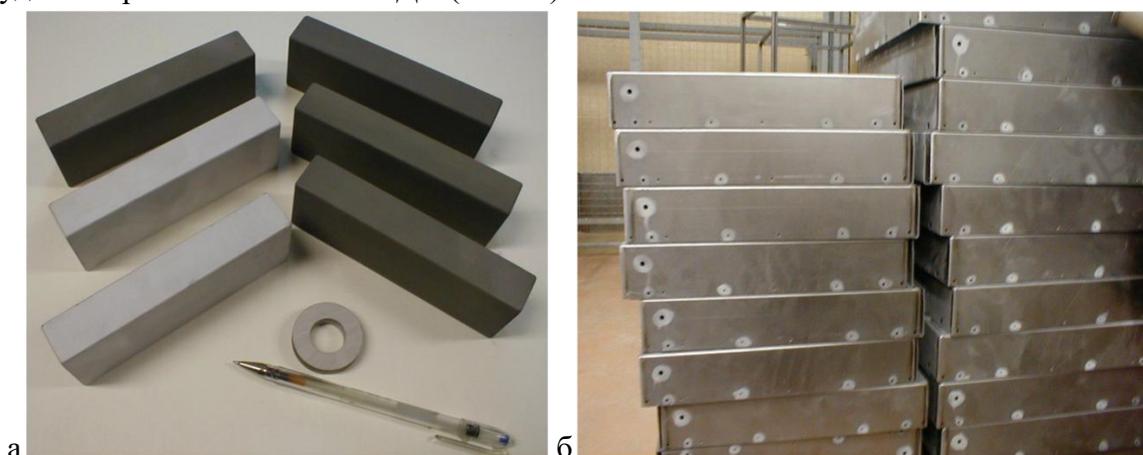


Рис.27. Покрытия ГДН на спечённых магнитах (а) и на локальных участках стальных корпусов (б).

Простота нанесения локальных тонких покрытий из мягких металлов без разупрочнения поверхности детали позволяет применять газодинамическое напыление для нанесения противозадирных покрытий на резьбу мощных соединяемых деталей, что снижает вероятность схватывания деталей и значительно повышает их ресурс (Рис.28).

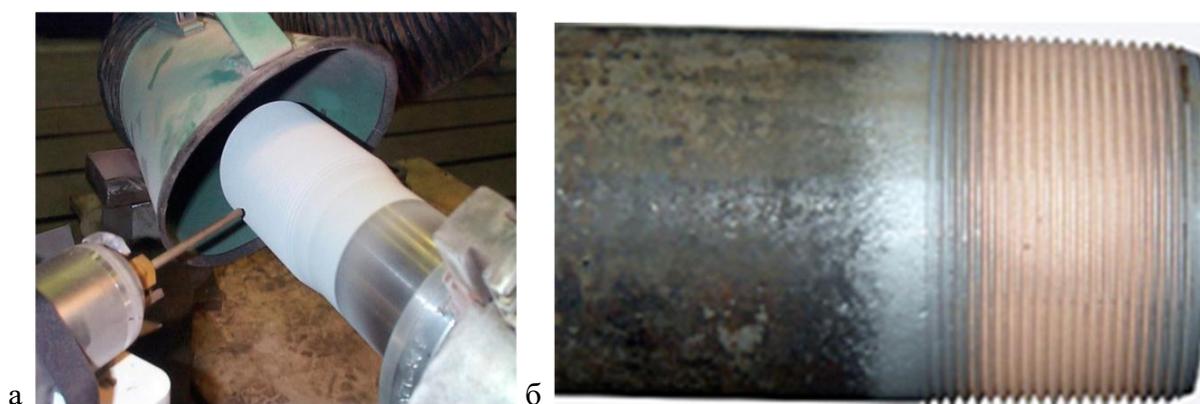


Рис.28. Противозадирные покрытия на болтах крепления гребных винтов (а) и резьбе НКТ для нефтедобычи (б).

Устранение дефектов литья и механических повреждений

Множество металлообрабатывающих предприятий сталкиваются с проблемами дефектов литья. Сквозные дефекты в тонких стенках, приводящие к потере герметичности, локальные дефекты на гладкой поверхности, ухудшающие внешний вид, могут быть причиной выбраковки изделий, на изготовление которых затрачены значительные время и средства. Возможность нанесения плотных металлических покрытий любой толщины («наращивания» металла) на поверхность деталей из любых металлов и сплавов без сильного нагрева во многих случаях делает газодинамическое напыление самым выгодным способом устранения литейного брака (Рис.29).

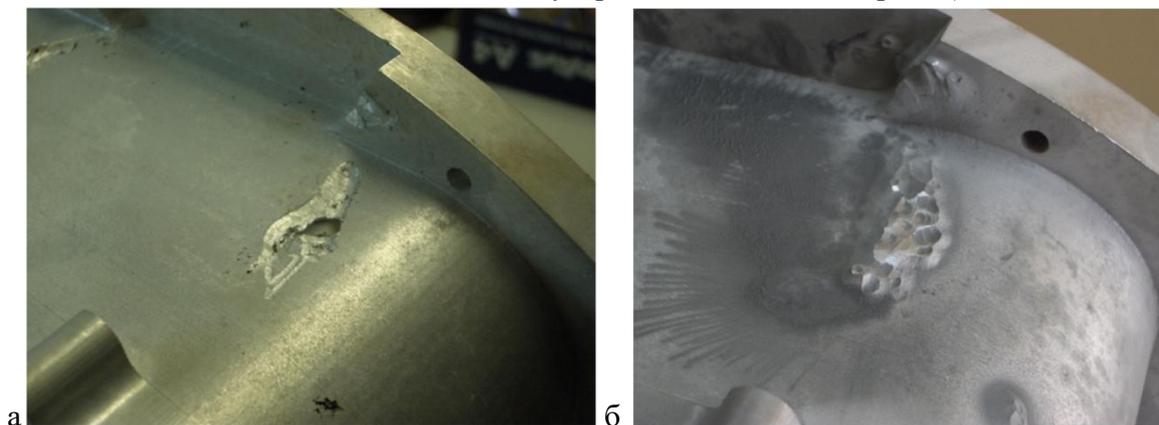


Рис.29. Устранение дефектов литья оборудованием «ДИМЕТ». Наличие загрязнений маслом не препятствует нанесению толстого герметичного покрытия.

Устранение механических повреждений при изготовлении сложных деталей или небольшие локальные изменения их формы также могут быть оперативно выполнены ручным портативным оборудованием ГДН (Рис.30).

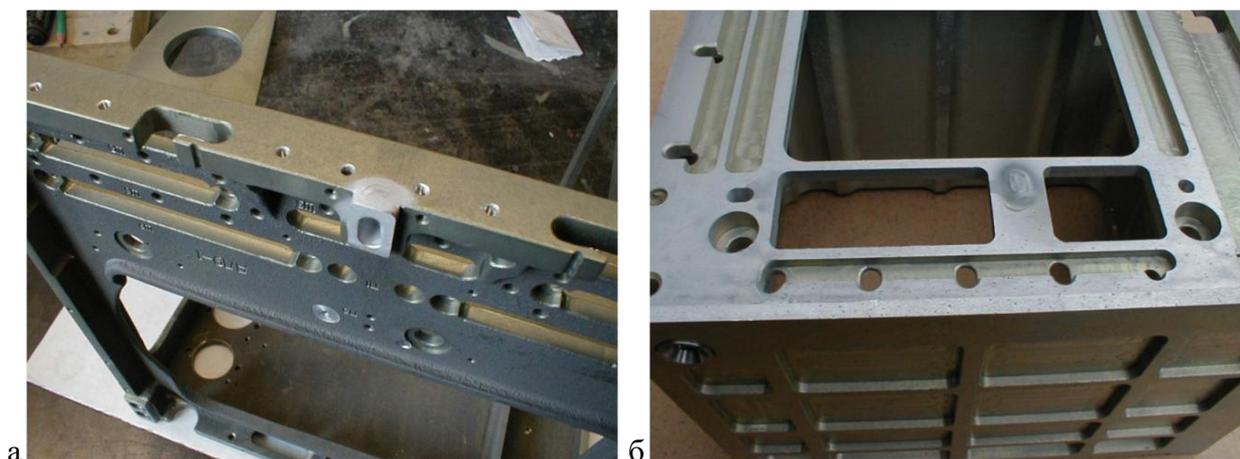


Рис.30. Устранение механических повреждений сложной детали.

Похожие дефекты возникают не только в процессе производства, но, даже в более значительной степени, в процессе эксплуатации деталей. В этом случае оборудование ГДН становится необходимым инструментом ремонтников, позволяющим без значительного температурного воздействия на свойства детали «наращивать» металл там, где его не хватает.

Восстановление посадочных мест подшипников, устранение износа и дефектов на массивных медных деталях охлаждения в металлургическом производстве, устранение небольших дефектов на крупногабаритных валах полиграфических и бумажных машин, удаление коррозионных повреждений на деталях из алюминиевых и магниевых сплавов в узлах авиационной техники – лишь небольшой перечень применения оборудования ГДН в ремонтных работах [33]. Отдельно можно выделить ремонт и устранение дефектов на дорогостоящих оснастке и формах для изготовления пластмассовых и резиновых изделий - от пластиковой тары до автомобильных шин.

Естественно, что ГДН нашел широкий спектр применения в наиболее распространённом виде ремонта - ремонте автомобильной и дорожной техники, в частности при ремонте блоков цилиндров и ГБЦ, восстановлении реек, штоков и ступиц, устранении течей радиаторов и коррозионных повреждений кузова. Реставрация ретро автомобилей – особое применение ГДН.

Реставрация

Именно возможность восстановления формы и размеров металлических изделий без внесения каких-либо изменений в их свойства и структуру в исходном состоянии, свойство, присущее газодинамическому напылению, востребовано в процессах реставрации. Современные реставраторы включили метод ГДН низкого давления в число применяемых технологий (Рис.31).



Рис.31. Реставрация скульптур Исаакиевского собора в Санкт-Петербурге.

Несмотря на большие технические возможности ГДН высокого давления, широкому распространению газодинамического напыления способствует в большей степени снижение энергоёмкости, простота использования и компактность оборудования ГДН низкого давления.

Заключение

Хотя метод ГДН появился и начал развиваться в России, подавляющее большинство публикаций, связанных с исследованиями ГДН, представлены зарубежными исследователями. Однако именно собственные разработки позволили наладить в России производство оборудования газодинамического напыления низкого давления с товарным

знаком «ДИМЕТ». Это оборудование нашло широкое применение в нашей стране и за рубежом.

К сожалению, до сих пор существует только два документа, регламентирующих применение ГДН. Один документ – раздел в обновлённой версии ГОСТ 9581-80, регулирующий нанесение покрытий на контактную поверхность зажимной части кабельных наконечников способом газодинамического напыления. Второй документ – стандарт министерства обороны США MIL-STD-3021 регулирующий применение ГДН в ремонте военной техники. Как в России, так и за рубежом, многочисленные предприятия, применяющие метод ГДН, используют собственные внутренние регламентирующие документы. В основном это объясняется огромным разнообразием задач, решаемых с помощью метода газодинамического напыления, соответствие которым определяются внутри предприятий.

Несмотря на то, что больше всего установок газодинамического напыления используются в практическом применении на территории России, в российской научно-технической литературе пока появилось довольно ограниченное количество публикаций о характеристиках и свойствах покрытий, наносимых ГДН [7, 34, 35]. Тем не менее, уже на их основании можно делать полезные практические выводы о возможностях и условиях применения покрытий для защиты от коррозии, восстановлении изношенных посадочных мест, изменения триботехнических свойств поверхностей. Хочется надеяться, что весьма востребованные данные о возможности восстановления методом ГДН изнашиваемых деталей и узлов двигателей, о кавитационной стойкости покрытий в жидких средах, о стойкости покрытий при вибрационных нагрузках, то есть обоснования, необходимые для практического использования ГДН в реальных условиях эксплуатации техники будут чаще появляться в отечественных доступных публикациях.

Новые исследования, связанные с определением предельных вибрационных нагрузок, ресурсом восстановленных газодинамическим напылением элементов двигателей, стойкостью покрытий в предельных условиях эксплуатации технических узлов, могли бы позволить максимально обоснованно использовать преимущества метода ГДН в процессах производства и ремонта продукции машиностроения.

Литература

1. Бобров Г.В., Ильин А.А. Нанесение неорганических покрытий. - Москва, «Интермет Инжиниринг», 2004, 624 с.
2. Алхимов А.П., Косарев В.Ф., Папырин А.Н. Метод «холодного» газодинамического напыления, ДАН СССР, т.315, 1990, стр.1062 – 1065.
3. Алхимов А.П., Клинков С.В., Косарев В.Ф., Фомин В.М. Холодное газодинамическое напыление. Теория и практика. – М.: ФизМатЛит, 2010. – 536 с.
4. A. Papyrin, V. Kosarev, S. Klinkov, A. Alkhimov, V. Fomin. Cold Spray Technology. – Elsevier, 2007, 328 p.
5. Champagne V. (ed). The cold spray materials deposition process. – Wodhead Publishing/CRC Press, Cambridge, 2007, 327 p.
6. J. Villafuerte (ed). Modern Cold Spray – Materials, Process and Applications. 2015, Springer International, Switzerland, 429 p.

7. В.Е. Архипов, А.Ф. Лондарский, Г.В. Москвитин, М.С. Пугачёв. Газодинамическое напыление. Структура и свойства покрытий. – М.; КРАСАНД, 2017. – 240с.
8. P. Cavaliere (ed) Cold Spray Coatings – Recent Trends and Future Perspectives. 2018, Springer International, Switzerland, 570 p.
9. H. Assadi, F. Gartner, T. Stoltenhoff, H. Kreye. Bonding mechanism in the cold gas spraying. – Acta Materialia, 2003, 51 (15), p.4379 – 4394.
10. T. Schmidt, F. Gartner, H. Assadi, H. Kreye. Development of a generalized parameter window for cold spray deposition. - Acta Materialia, 2006, 54 (3), p.729 – 742.
11. T. Hussain, D.G. McCartney, P.H. Shipway, D. Zhang. Bonding mechanisms in cold spraying: The contributions of metallurgical and mechanical components. – Journal Thermal Spray Technology, 2009, 18, p.364 – 379.
12. Ю.С. Бараш. Силы Ван-дер-Ваальса. – М.: Наука, 1988. – 344 с.
13. K.-R. Donner, R. Roedel, F. Gartner, T. Klassen. Chemical interaction and bonding in Cold Gas Spraying. - Proceedings of the 2011 International Thermal Spray Conference (Hamburg, Germany). DVS Verlag, 2011.
14. Каширин А.И., Шкодкин А.В. Метод газодинамического напыления металлических покрытий: развитие и современное состояние. – Упрочняющие технологии и покрытия, 2007, № 12 (36), с.22 – 33.
15. T. Schmidt, H. Assadi, F. Gartner, H.Richter, T. Stoltenhoff, H. Kreye, T. Klassen. From particle acceleration to impact and bonding in cold spraying. - Journal Thermal Spray Technology, 2009, 18 (5 - 6), p.794 – 808.
16. Алхимов А.П., Косарев В.Ф., Папырин А.Н. Газодинамическое напыление. Экспериментальное исследование процесса напыления. – ПМТФ, 1998, т.39, № 2, с.182-188.
17. T. Schmidt, F. Gartner, H. Kreye, T. Klassen. Correlation of particle impact conditions and coating properties in cold spraying. - Thermal Spray Crossing Borders: Proceedings of the 2008 International Thermal Spray Conference (Maastricht, Netherlands), (Ed.) E. Lugscheider. DVS Verlag, 2008.
18. A. Shkodkin, A. Kashirin, O. Klyuev. Substrate Properties Influence on the Coating Deposition by DYMET Technology. - Thermal Spray Crossing Borders: Proceedings of the 2008 International Thermal Spray Conference (Maastricht, Netherlands), (Ed.) E. Lugscheider. DVS Verlag, 2008.
19. E. Irissou, J.-G. Legoux, C. Moreau, A.N. Ryabinin. How cold is cold spray? An experimental study of the heat transfer to the substrate in cold gas dynamic spraying. - Thermal Spray Crossing Borders: Proceedings of the 2008 International Thermal Spray Conference (Maastricht, Netherlands), (Ed.) E. Lugscheider. DVS Verlag, 2008.
20. A.Shkodkin, A.Kashirin, O.Klyuev, T.Buzdygar. Metal particles deposition stimulation by surface abrasive treatment in gas dynamic spraying. – Journal of Thermal Spray Technology, 2006, V. 15, N 3, p.382-386.
21. A.Shkodkin, A.Kashirin, O.Klyuev, T.Buzdygar. The basic principles of DYMET technology. - Building on 100 Years of Success: Proceedings of the 2006 International Thermal Spray Conference (Seattle, USA), B.R. Marple, M.M. Hyland, Y.C. Lau, R.S. Lima, and J. Voyer, Eds., ASM International, 2006.

22. О.Ф.Клюев, А.И.Каширин, А.В.Шкодкин. Технология газодинамического нанесения металлических покрытий. Часть 1. Процесс формирования покрытий. - «Сварщик», 2003, №4 (32), с.25-27.
23. T. Buzdygar, A. Kashirin, O. Klyuev, A.Shkodkin. Sealing Up the Holes by Gas Dynamic Spraying. – Thermal Spray Crossing Borders: Proceedings of the 2008 International Thermal Spray Conference (Maastricht, Netherlands), (Ed.) E. Lugscheider. DVS Verlag, 2008.
24. R. Huang, H. Fukanuma. Study of the properties of cold sprayed In718 deposits. – Proceedings of the 2016 International Thermal Spray Conference (Shanghai, China), DVS Verlag, 2016.
25. F. Gartner, T. Stoltenhoff, T. Schmidt, H. Kreye. The cold spray process and its potential for industrial applications. - Journal of Thermal Spray Technology, 2006, V. 15, N 2, p.223-232.
26. V. Luzin, K. Spencer, M. Zhang. Residual stress and thermo-mechanical properties of cold spray metal coatings. – Acta Materialia, 2011, 59, p.1259-1270.
27. Каширин А.И., Шкодкин А.В. «Способ металлизации керамики под пайку», патент РФ №2219145, 2002.
28. T. Stoltenhoff, C. Borchers, F. Gartner, H. Kreye. Microstructures and key properties of cold-sprayed and thermally sprayed copper coatings. – Surface and Coatings Technology, 2006, V.200, issue 16-17, p.4947-4960.
29. H. Koivuluoto, P. Vuoristo. Structure and corrosion properties of cold sprayed coatings: a review. - Surface Engineering, 2014, 30 (6), p.404-414.
30. N. Bala, H. Singh, J. Karthikeyan, S.Prakash. Cold spray coating process for corrosion protection: A review. – Surface Engineering, 2014, 30 (6), p.414-421.
31. E. Irissou, J.-G. Legoux, A.N. Ryabinin, B. Jodoin, C. Moreau. Review on cold spray process and technology: Part 1 – Intellectual property. - Journal of Thermal Spray Technology, 2008, V. 17, N 4, pp.495 -516.
32. Бuzдыгар Т.В., Каширин А.И., Клюев О.Ф. Портнягин Ю.И. «Способ получения покрытий», патент РФ №2038411, 1993. Оpubл. 27.06.95, Бюл. № 18.
33. <http://dymet.info/ru/index.html> Дата обращения 10 апреля 2018.
34. В.Е. Архипов, А.Ф. Лондарский, Г.В. Москвитин, М.С. Пугачёв, Н.С. Фалалеев. Свойства алюминий – цинкового покрытия, нанесенного газодинамическим напылением. - Упрочняющие технологии и покрытия, 2016, № 6, с.28 – 34.
35. П.И. Бурак, А.В. Серов, А.И. Каширин, А.В. Шкодкин. Износостойкость покрытий, полученных газодинамическим напылением. – Ремонт, восстановление, модернизация, 2011, № 7, с.26-30.