

На правах рукописи

СОВА АЛЕКСЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАНЕСЕНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ
ПОКРЫТИЙ МЕТОДОМ ХОЛОДНОГО ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ**

01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Новосибирск 2009

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институте теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения РАН

Научные руководители: доктор физико-математических наук
Косарев Владимир Федорович

Официальные оппоненты: доктор технических наук
Ульяницкий Владимир Юрьевич

доктор технических наук
Михатулин Дмитрий Сергеевич

Ведущая организация: Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

Защита состоится 26 февраля 2010 г. в 11 ч. 00 мин. на заседании Диссертационного совета Д 003.035.02 при Учреждении Российской академии наук Институте теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН по адресу: 630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, 4/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения Российской академии наук Института теоретической и прикладной механики СО РАН

Отзывы на автореферат, заверенные гербовой печатью организации, просьба направлять на имя ученого секретаря организации по указанному адресу в двух экземплярах не позднее, чем за две недели до защиты.

Автореферат разослан «_____» _____ 20 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук



И.М. Засыпкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Метод холодного газодинамического напыления (ХГН) является сравнительно новым способом нанесения порошковых покрытий. Формирование покрытия происходит при температурах, значительно ниже температуры напыляемого материала, что является основным отличием ХГН от методов газотермического напыления. Подавляющее большинство проведенных в области ХГН исследований посвящены напылению однокомпонентных покрытий, то есть покрытий, состоящих из частиц одного материала (чистый металл или сплав). Однако в последнее время все больший интерес для исследователей и технологов представляет процесс холодного газодинамического напыления многокомпонентных покрытий. Такие покрытия обладают уникальными свойствами, существенно отличающимися от свойств однокомпонентных покрытий.

Многокомпонентные покрытия, получаемые методом ХГН, можно разделить на два типа. Покрытия первого типа наносят с помощью напыления порошков, состоящих из композитных частиц, имеющих сложную многокомпонентную структуру. Данный способ является сравнительно новым, и его появление связано, в первую очередь, с возникновением технологической возможности изготавливать сложные порошки с внутренней структурой в промышленных масштабах.

Второй тип составляют покрытия, получаемые путем напыления смесей микродисперсных порошков. Разработка научных основ нового способа ХГН-нанесения многокомпонентных покрытий второго типа и исследование основных закономерностей формирования покрытий таким способом является целью данной диссертации.

Обзор научной литературы показывает, что изучение процесса ХГН-нанесения многокомпонентных покрытий, полученных напылением микродисперсных смесей, в настоящее время затруднено. В основном это связано с технологической сложностью реализации процесса. Как правило, нанесение таких покрытий производится путем напыления заранее приготовленных механических смесей с их подачей в дозвуковую либо сверхзвуковую область газового потока. Однако известно, что для каждого напыляемого материала существуют оптимальные параметры газового потока, которые могут не совпадать с оптимальными параметрами для другого материала смеси. В этих случаях одновременное напыление всех компонентов смеси либо невозможно вообще, либо коэффициенты напыления компонентов отличаются друг от друга в разы, что приводит к различию между стехиометрией напыляемой смеси и получаемого покрытия. В связи с этим требуется разработать новый подход к холодному газодинамическому напылению смесей, позволяющий варьировать в широком диапазоне скорость и температуру частиц каждого напыляемого порошка, и тем самым осуществлять управление процессом напыления смеси. В настоящей работе впервые предлагается проводить управление температурой и скоростью частиц напыляемой смеси порошков не только путем варьирования параметров

газового потока, но и путем независимой инъекции каждого компонента напыляемой смеси в разные области потока газа.

Одним из направлений в нанесении ХГН-покрытий из смесей порошков является напыление металлокерамических покрытий. Напыление керамических порошков методом ХГН в подавляющем большинстве случаев невозможно вследствие непластичности керамических частиц. Однако напыление смесей металлического и керамического порошков возможно. В этом случае металлический компонент играет роль матрицы, удерживающей керамические частицы. Данные покрытия обладают рядом уникальных свойств, включая высокую адгезию и повышенную износостойкость. В настоящее время экспериментально показано, что процесс формирования металлокерамических покрытий имеет ряд особенностей, обусловленных взаимным влиянием керамических и металлических частиц на процесс напыления. Однако данные особенности в настоящий момент являются слабо изученными и требуют дальнейших экспериментальных и теоретических исследований.

Цели работы

1. Исследование влияния типа подачи порошка в газовый поток (введение в дозвуковую область и сверхзвуковую область) на скорость и температуру частиц при вылете из сопла.
2. Разработка способа нанесения многокомпонентных покрытий путем раздельного ввода компонентов смеси в дозвуковую и сверхзвуковую области.
3. Применение разработанного способа для экспериментального исследования особенностей процесса формирования многокомпонентных металлических покрытий.
4. Экспериментальное исследование особенностей ХГН-нанесения металлокерамических покрытий, влияния параметров керамического порошка (размера, массового содержания в смеси и т.д.) на процесс формирования покрытий.
5. Разработка рекомендаций по дальнейшему развитию способа ХГН-нанесения многокомпонентных покрытий с помощью раздельной подачи напыляемых компонентов.

Научная новизна

Экспериментально и теоретически показано, что в условиях ХГН скорость и температура микродисперсных частиц перед соударением с преградой зависят от того, в какую область потока в сопле Лавалья – дозвуковую или сверхзвуковую – они инжектированы.

Впервые предложен способ холодного газодинамического напыления многокомпонентных металлических покрытий с раздельной инъекцией каждого напыляемого компонента в различные области сопла с целью оптимального нагрева и ускорения частиц каждого порошка.

Для реализации подачи компонентов напыляемой смеси в сверхзвуковую область впервые предложено использовать эффект эжекции.

Проведено теоретическое и экспериментальное обоснование эффективности разработанного способа холодного газодинамического напыления многокомпонентных покрытий с отдельной подачей напыляемых компонентов на примере различных материалов.

Впервые предложен способ холодного газодинамического напыления многокомпонентных металлокерамических покрытий с отдельной инъекцией каждого напыляемого компонента в различные области сопла с целью оптимального нагрева и ускорения частиц каждого порошка, а также исключения эрозии стенок сопла в критическом сечении керамическими частицами.

Экспериментально исследованы некоторые особенности процесса формирования металлокерамических покрытий, в частности влияние процентного содержания керамики и размера керамических частиц на коэффициент напыления смеси.

Практическая значимость

Разработанный способ нанесения многокомпонентных покрытий методом ХГН может быть успешно применен как для проведения дальнейших исследований, касающихся изучения явления ХГН, так и для промышленных приложений. На разработанный способ и устройства для его реализации получены два российских и один европейский патент.

Достоверность результатов

Все исследования проведены с помощью известных и хорошо зарекомендовавших себя методов. Полученные результаты физически непротиворечивы, расчетные и экспериментальные данные удовлетворительно согласуются друг с другом. Важным свидетельством достоверности полученных в диссертации результатов является их апробация на национальных и международных симпозиумах и конференциях, а также обсуждение этих результатов со специалистами в данной области.

На защиту выносятся

1. Результаты численного исследования влияния расположения точки ввода порошка в поток газа на скорость и температуру частиц в момент удара.
2. Способ нанесения многокомпонентных покрытий (металл + металл, металл + керамика) методом ХГН с отдельной подачей напыляемых компонентов смеси в различные области газового потока с целью оптимального нагрева и ускорения частиц каждого компонента напыляемой смеси, а также исключения эрозии керамическими частицами стенок сопла в критическом сечении.
3. Результаты расчетного и экспериментального исследования процесса нанесения многокомпонентных покрытий (металл + металл) предложенным способом на примере нескольких материалов.
4. Результаты экспериментального исследования влияния процентного содержания керамики в напыляемой смеси, а также размера керамических частиц на процесс формирования металлокерамического покрытия.

Апробация работы

Результаты работы докладывались на семинарах академика В.М. Фомина в ИТПМ СО РАН, на семинарах профессора И. Смурова в Национальной инженерной школе Сэнт-Этьена (Франция), а также на различных российских и международных конференциях: XLII Международной научной студенческой конференции «Студент и научно-технический прогресс» (Новосибирск, 2004); XII Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых (Новосибирск, 2006); IX Всероссийском съезде по теоретической и прикладной механике (Нижний Новгород, 2006); Международной конференции по термическому напылению (Маастрихт, Нидерланды, 2008); 13-й и 14-й международных конференциях «Методы аэрофизических исследований (ICMAR)» (Новосибирск, Россия, 2007, 2008); 4-й и 5-й Европейских летних школах «Перспективные методы обработки поверхности и их перспективы в промышленности» (Сэнт-Этьен, Франция, 2007, 2009).

Кроме того, получены три патента: Патент РФ № 2353705. Способ газодинамического напыления порошковых материалов и устройство для его реализации, 2009; Патент РФ № 2334827. Устройство газодинамического напыления порошковых материалов, 2008; European Patent № 1 925 693 A2 Method and device for coating, 2008.

Публикации

Основные результаты диссертации опубликованы в 5 статьях в рецензируемых журналах и 9 материалах всероссийских и международных конференций, получено два российских и один европейский патент.

Личный вклад автора

При выполнении работ по теме диссертации диссертант принимал активное участие в постановке задач, обсуждении результатов, подготовке печатных работ и докладов на конференциях. Основные результаты диссертации получены при непосредственном участии автора. Им проведены все эксперименты и расчеты, представленные в работе. Результаты совместных работ представлены в диссертации с согласия соавторов.

Структура работы

Работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы в 128 наименований. Объем диссертации составляет 120 страниц, в том числе 92 рисунка и 4 таблицы.

Во введении кратко анализируется состояние вопроса. Обосновывается актуальность темы, формулируется цель работы. Приводится краткое описание диссертации по главам, и формулируются основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава содержит обзор публикаций, посвященных ХГН, проводится анализ приоритетных направлений работы исследователей в области холодного газодинамического напыления. В пунктах 1.1 и 1.2 главы сформулированы направления работ в области исследования процесса ХГН, кратко представлены основные на сегодняшний день результаты по каждому из направлений. В

пункте 1.3 проанализированы работы, посвященные напылению многокомпонентных покрытий методом ХГН. Сформулированы основные векторы исследования в данном направлении, очерчен круг проблем, существенно затрудняющих исследования. В конце главы в виде тезисов сформулированы наиболее актуальные на сегодняшний день научные и технологические проблемы данного направления:

1) Известно, что для эффективного холодного напыления каждого материала требуется подобрать оптимальные именно для этого материала параметры газового потока. Зачастую оказывается невозможным подобрать температуру газового потока так, чтобы она обеспечивала напыление всех компонентов смеси. Важно также отметить, что чрезмерное повышение температуры газового потока ведет к налипанию порошка на внутренние стенки сопла, а также приводит к ухудшению качества напыляемого покрытия.

2) Процесс напыления металлокерамических смесей существенно отличается от процесса нанесения напыления чистого металла. В частности, коэффициент напыления металлокерамической смеси значительно отличается от коэффициента напыления чистого металла. Это напрямую указывает на взаимное влияние компонентов смеси на процесс напыления. В связи с этим, исследование влияния параметров керамических частиц (тип, размер, массовая доля в смеси и т.д.) и параметров газа на процесс ХГН металлокерамических смесей является актуальным.

3) Напыление металлокерамических смесей сопровождается сильным износом сопла в области критического сечения из-за эрозионного воздействия керамических частиц. Это быстро приводит сопловой узел в негодность. Устранение эрозии стенок сопла в критическом сечении являлось бы актуальным технологическим усовершенствованием процесса ХГН.

Вторая глава посвящена задаче исследования влияния расположения точки ввода порошка в сопло на скорость и температуру частиц при вылете из сопла. С помощью модели расчета газового потока, основанного на одномерной изоэнтропической теории движения газа с учетом влияния пограничного слоя (расчет по уравнению Кармана) были проведены численные расчеты скорости и температуры частиц, введенных в различные точки сопла Лаваля. Расчет скорости частиц проводился по уравнению

$$\frac{dv_p}{dt} = C_D \frac{\rho}{2m_p} S_p (v - v_p)^2,$$

здесь v , v_p – скорости газа и частиц, m_p – масса частицы, ρ – плотность газа, S_p – площадь миделевого сечения частицы, t – время, C_D – коэффициент сопротивления. Температура частиц рассчитывалась согласно уравнению

$$\rho_p v_p c_p \frac{dT_p}{dz} = Nu \frac{6\lambda}{d_p^2} (T_{0p} - T_p),$$

где ρ_p , v_p , c_p , T_p , d_p – плотность, скорость, теплоемкость, температура и размер частицы соответственно, Nu – число Нуссельта, z – координата по оси сопла, λ – теплопроводность T_{op} – температура торможения газа на частице.

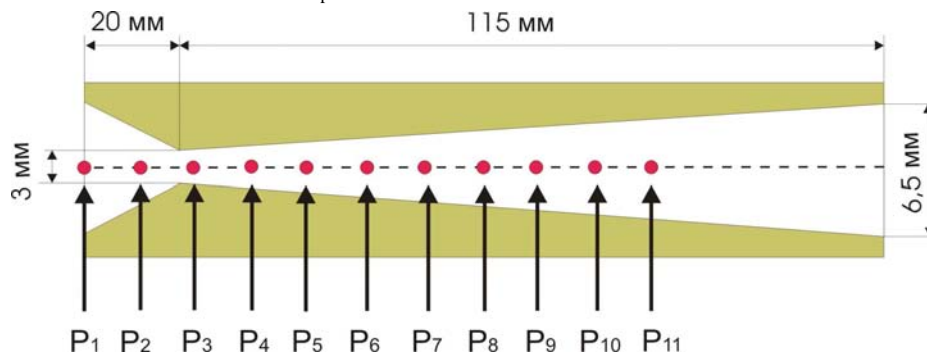
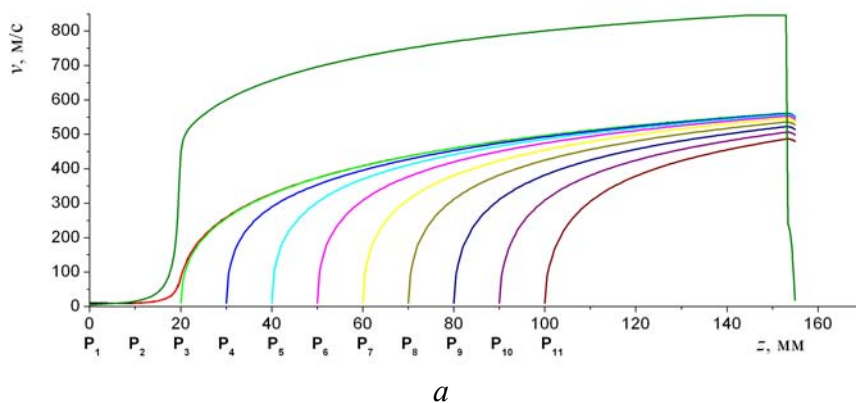
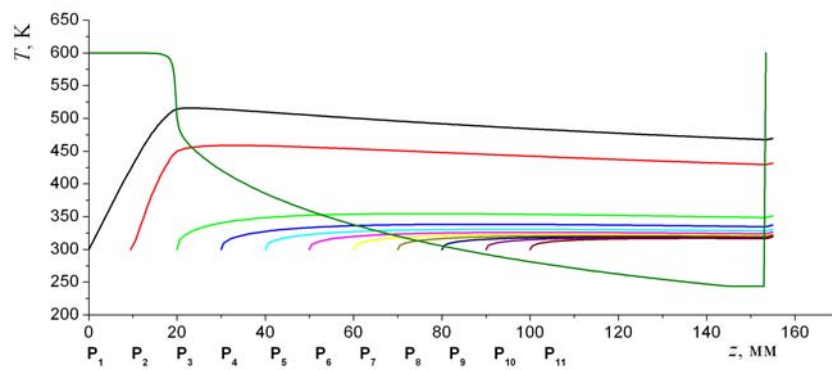


Рис. 1. Геометрические параметры сопла и схема расположения точек инъекции порошка в сопло, использовавшиеся в численных расчетах.

Расчет проводился для частиц алюминия и меди размером 30 мкм, инжестированных в точки, отстоящие на расстояние от 0 до 100 мм от входа в сопло с шагом в 10 мм (рис. 1). Видно, что точки P_1 и P_2 находятся в дозвуковой части сопла, точка P_3 в критическом сечении, а все последующие точки инъекции порошка находятся в сверхзвуковой области сопла.



а



б

Рис. 2. Эволюция скорости (а) и температуры (б) алюминиевых частиц, размером 30 мкм в зависимости от точки инъекции порошка в поток.

$$p_0 = 1,6 \text{ МПа}, T_0 = 500 \text{ К}.$$

Варьирование значений давления торможения и температуры торможения потока производилось в пределах $p_0 = 1,6 - 3$ МПа и $T_0 = 500 - 900$ К соответственно. На рис. 2 представлены примеры эволюции скорости и температуры частиц, инжестированных в различные точки сопла, полученные в результате расчетов. Из рис. 2,а видно, что разгон частиц происходит в основном в сверхзвуковой части сопла и решающую роль в значении выходной скорости частиц играет длина сверхзвукового участка. В данном случае частицы,

введенные в сопло через точку 1 и точку 11, имеют отличие в выходной скорости около 100 м/с в случае алюминия и 150 м/с в случае меди. Рисунок также иллюстрирует, что варьирование координаты точки ввода в рассмотренных пределах изменяют скорость частиц при вылете из сопла не более чем на 15 %.

Совершенно иначе местоположение точки ввода порошка влияет на температуру частиц (см. рис. 2,б). Частицы, введенные в поток после критического сечения, то есть в сверхзвуковую область, не имеют участка интенсивного нагрева вследствие того, что теплообмен между газом и частицей в сверхзвуковой области значительно ниже, чем в дозвуковой области. Поэтому их температура на вылете из сопла заметно ниже, чем у частиц, введенных в дозвуковую область.

Таким образом, из результатов расчетов следует, что выбор точки ввода порошка (в форкамеру сопла или в сверхзвуковую область) оказывает значительное влияние на температуру частиц при вылете из сопла. Данный эффект можно использовать для напыления многокомпонентных покрытий из порошков с существенно различными температурно-скоростными требованиями для напыления (рис. 3).

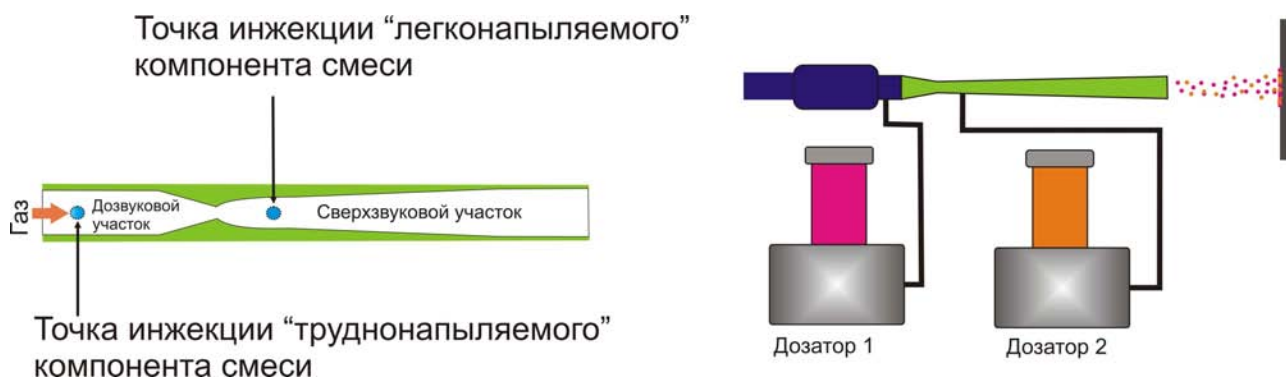


Рис. 3. Схема ХГН-нанесения смесей металлических порошков методом раздельной инъекции компонентов.

Для компонентов смеси, требующих интенсивного прогрева для реализации напыления, следует выбирать ввод в дозвуковую часть сопла. Более легконапыляемые компоненты (компоненты, требующие меньшего нагрева) следует вводить в сверхзвуковой части сопла. Подавая порошки различных материалов в разные точки сопла одновременно, можно добиться эффективного формирования многокомпонентного покрытия, поскольку частицы всех компонентов в момент вылета из сопла будут иметь оптимальные для напыления параметры. Так как смешение компонентов будет происходить непосредственно в газодинамическом тракте, то соотношения компонентов в покрытии следует задавать, меняя их расход. При наличии дозаторов порошка высокой точности и управляемости это позволяет получать т.н. градиентные покрытия, то есть покрытия с переменным составом по толщине.

Подачу порошка в сверхзвуковую область было предложено осуществлять с помощью принципа эжекции (рис. 4). В этом случае порошок подается из до-

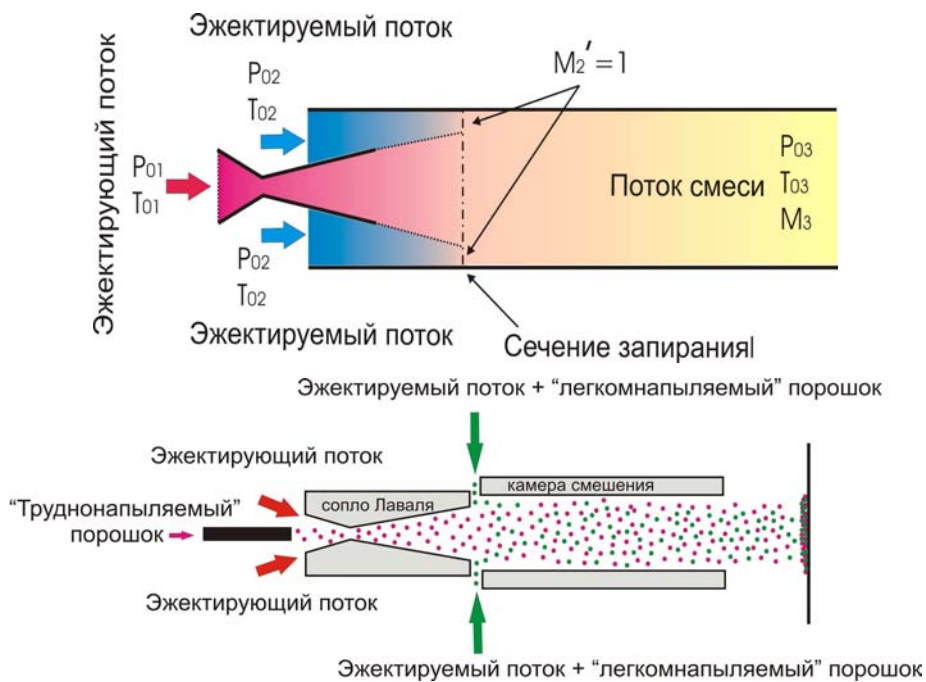


Рис. 4. Принципиальная схема эжекторного сопла и схема его применения для реализации напыления смесей порошков.

ментальной и расчетной проверке предложенного способа напыления многокомпонентных покрытий. Было сконструировано сопло, позволяющее производить подачу порошка как в дозвуковую, так и в сверхзвуковую область потока.

Целью первых экспериментов являлась проверка полученных в Главе 2 расчетных данных, указывающих, что один и тот же порошок, поданный в дозвуковую область сопла, будет нагреваться до более высоких температур, чем порошок, введенный в сверхзвуковую область. Это должно непосредственно отразиться на процессе напыления. В частности, предполагалось, что порошок алюминия, поданный в дозвуковую область потока, будет напыляться при более низких температурах торможения газа, чем такой же порошок, введенный в сверхзвуковую область. Эксперименты показали, что напыление порошка алюминия с коэффициентом напыления (отношение массы покрытия к массе выброшенного порошка) около 0,5, введенного в дозвуковую область, реализуется при температуре торможения газа около 473 К. Увеличение температуры торможения газа приводит к слипанию частиц алюминия в потоке и налипанию на стеки сопла, что сигнализирует о перегреве порошка. В случае подачи порошка алюминия в сверхзвуковую область коэффициент напыления достигает 0,5 при температуре торможения не менее 673 К (рис. 5).

В случае подачи порошка в сверхзвуковую область потока при температуре торможения 473 К покрытие практически не напыляется. Увеличение температуры торможения приводит к закреплению частиц на подложке. Устойчивый процесс напыления данного алюминиевого порошка происходит при температуре торможения газа не менее 650 К.

затора 2 (см. рис. 3), находящегося под атмосферным давлением, за счет эффекта эжекции, что существенно упрощает конструкцию дозатора и установки в целом.

Расчет сверхзвукового эжектора с параметрами, необходимыми для реализации ХГН, производится с помощью одномерной теории эжекции.

Глава 3 посвящена экспери-

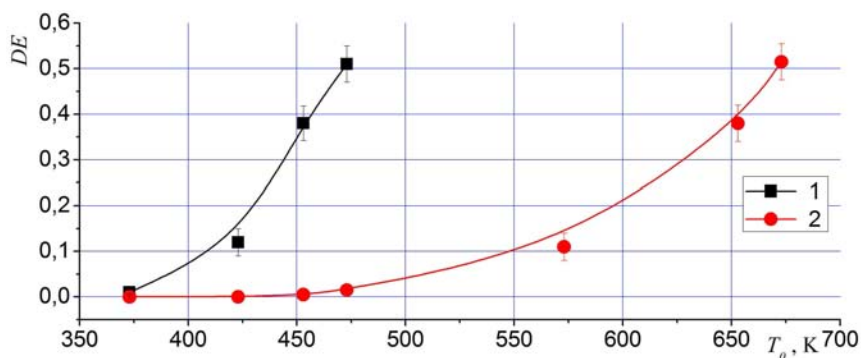


Рис. 5. Зависимость коэффициента напыления порошка алюминия, введенного в различные области сопла, от температуры торможения газа (азот).

1 – ввод в дозвуковую область; 2 – ввод в сверхзвуковую область; $p_0 = 1,6$ МПа.

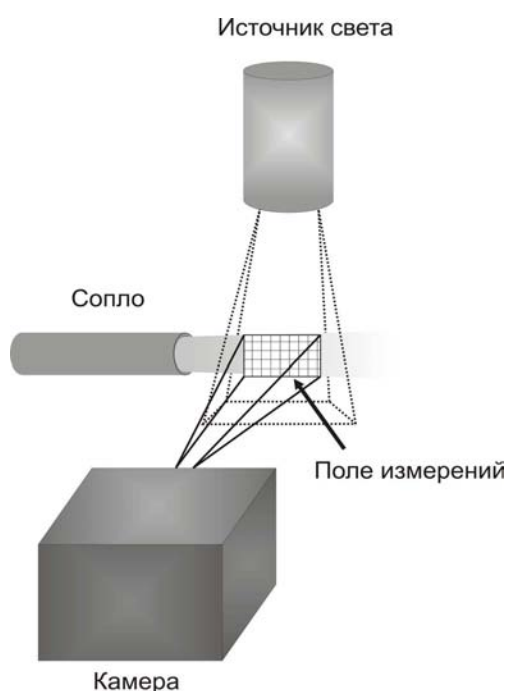


Рис. 6. Схема установки для измерения скорости частиц методом треков.

Расчеты газового потока и параметров частиц (FLUENT), проведенные при входных параметрах газового потока идентичных экспериментальным, показывают, что разница между температурами частиц алюминия, введенных в дозвуковую и сверхзвуковую области разработанного сопла, может достигать 150 К.

Для верификации полученных расчетных данных было проведено экспериментальное измерение скорости частиц. Измерение производилось с помощью известного метода треков. Схема установки для измерения скорости частиц представлена на рис. 6.

Сравнение результатов расчетов и измерений показывает хорошее совпадение экспериментальных и расчетных данных.

Далее, на примере напыления покрытия медь + алюминий, были проведены эксперименты с целью проверки эффективности

предложенного способа нанесения многокомпонентных покрытий. Подача порошка меди, как порошка, требующего более интенсивного прогрева, осуществлялась в дозвуковую область сопла, подача алюминия осуществлялась в сверхзвуковую область сопла. На рис. 7 представлена зависимость коэффициента напыления получаемой смеси. Видно, что коэффициент напыления достигает 0,5 при температуре торможения газа 650 – 700 К. Анализ микрошлифов (см. рис. 8) полученного покрытия показывает наличие обоих напыляемых компонентов в покрытии, причем исходный состав компонентов сохраняется.

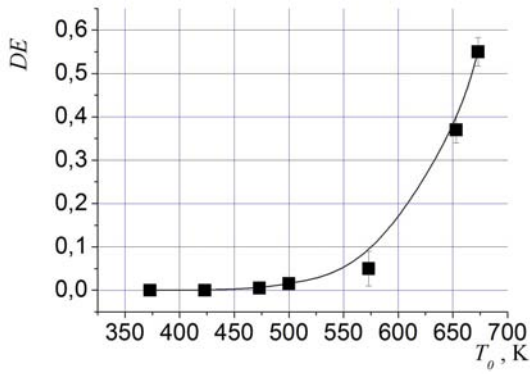


Рис. 7. Зависимость коэффициента напыления смеси порошков алюминия и меди, введенного в дозвуковую (медь) и сверхзвуковую (алюминий) области сопла, от температуры торможения газа.

$$p_0 = 1,6 \text{ МПа.}$$

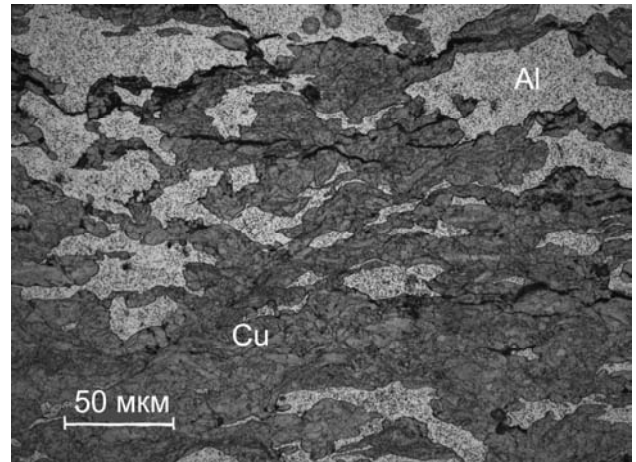
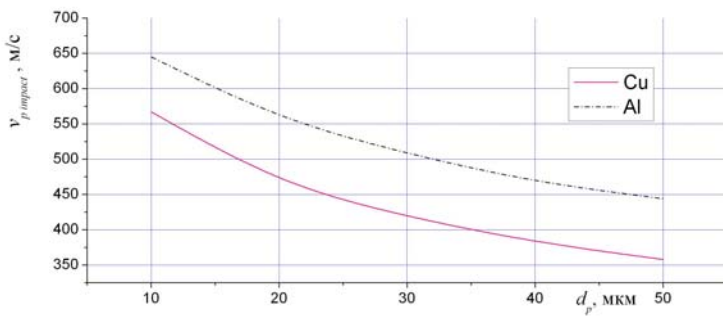
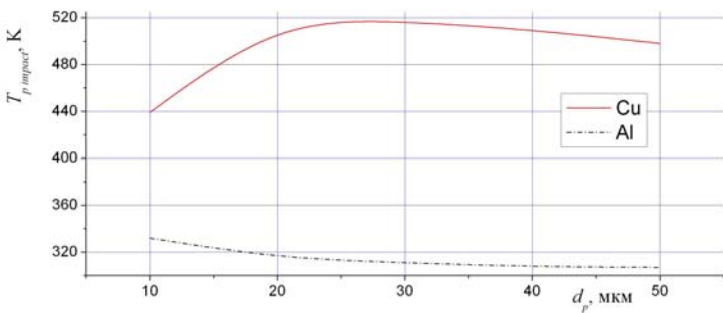


Рис. 8. Микрофотографии шлифа двухкомпонентного медно-алюминиевого покрытия.



a



б

Рис. 9. Скорость (*a*) и температура (*б*) частиц меди и алюминия перед ударом в зависимости от размера частиц. Подача порошка меди в дозвуковую область, подача порошка алюминия в сверхзвуковую область.

$$T_0 = 673 \text{ К, } p_0 = 2 \text{ МПа.}$$

Численный расчет (FLUENT) параметров частиц алюминия и меди, введенных в различные точки подачи порошка показывают, что их температуры и скорости на срезе сопла существенно отличаются. На рис. 9 приведены расчетные значения температуры и скорости перед ударом частиц алюминия и меди в зависимости от их размера.

Были также проведены эксперименты с нанесением покрытия титан-алюминий. Подача порошка титана, как порошка требующего нагрева до более высокой температуры, производилась в дозвуковую область сопла, подача алюминия – в сверхзвуковую. В процессе напыления состав смеси варьировался в пределах от 0 до 100 % массового содержания алюминия. В ка-

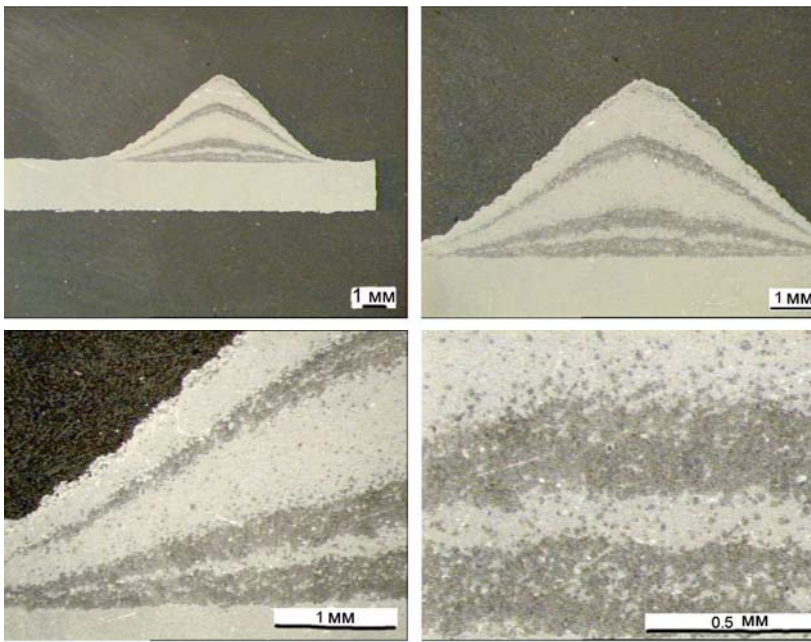


Рис. 10. Микрофотографии шлифа двухкомпонентного покрытия титан-алюминий с градиентом состава по толщине.

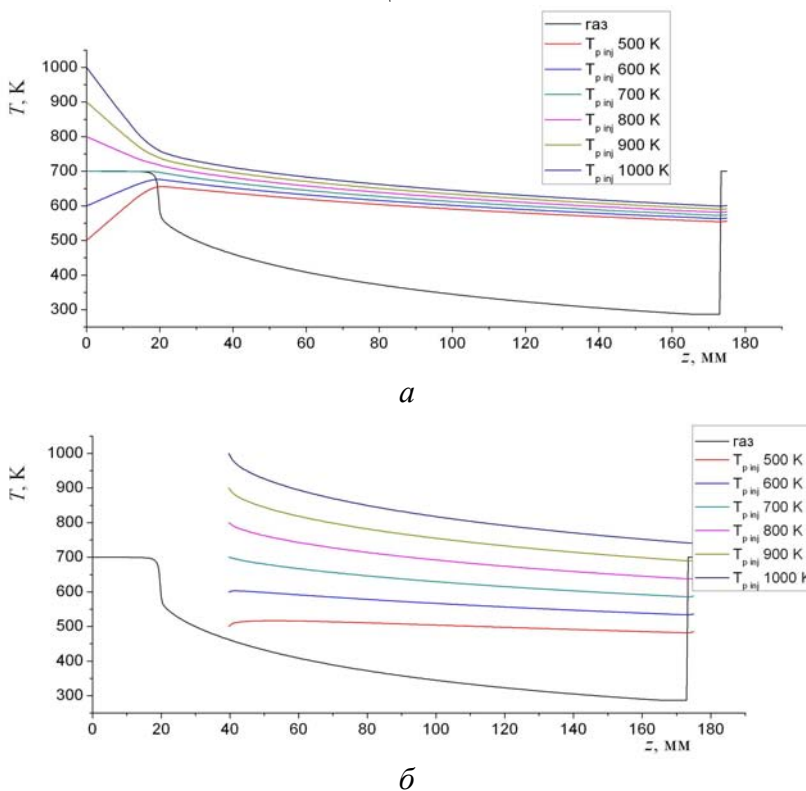


Рис. 11. Эволюция температуры медных частиц, размером 25 мкм в зависимости от температуры порошка перед вводом в дозвуковую (а) и сверхзвуковую область (б) потока.

$$p_0 = 3 \text{ МПа}, T_0 = 700 \text{ К}.$$

честве наглядного примера на рис. 10 представлены микрофотографии шлифов полученных покрытий. Видно, что варьирование процентного содержания смеси непосредственным образом отражается на составе (слои разного оттенка имеют различное процентное соотношение между компонентами).

В качестве развития разработанного способа холодного напыления многокомпонентных покрытий с отдельным вводом компонентов напыляемой смеси предложено проводить предварительный прогрев порошка каждого напыляемого компонента с целью независимого контроля температуры частиц каждого компонента при вылете из сопла.

Расчеты показывают, что наиболее эффективным предварительный прогрев является в случае введения порошков в сверхзвуковую область потока. В качестве примера результатов расчет на рис. 11 приведены графики эволюции температуры предварительно нагретых частиц меди, введенных в дозвуковую и сверхзвуковую области сопла.

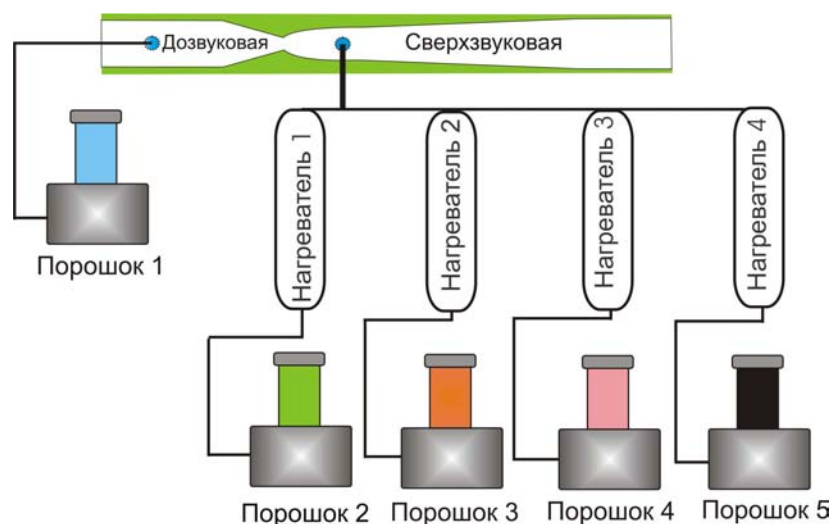


Рис. 12. Схема ХГН-нанесения смесей металлических порошков методом раздельной инъекции компонентов с независимым предварительным нагревом каждого компонента.

Видно, что в случае подачи порошка в сверхзвуковую область потока управление его входной температурой позволяет управлять температурой частиц на выходе в значительно более широком диапазоне, чем в случае подачи в дозвуковую область. В связи с этим перспективным выглядит способ холодного напыления многокомпонентных покрытий с независимым предварительным нагревом каждого компонента, подающегося в сверхзвуковую область (см. рис. 11).

Глава 4 диссертации посвящена разработке способа с раздельной подачей порошков в поток для реализации ХГН-нанесения металлокерамических покрытий и исследованию особенностей процесса их формирования.

Известно, что керамические порошки в чистом виде не могут быть напылены методом ХГН в связи с отсутствием пластичности. Обработка поверхности высокоскоростным потоком керамических частиц приводит только к ее эрозии. Однако в смеси с металлом часть керамических частиц остается в покрытии вследствие механического «заклинивания» и последующего «заклепывания» напыляющимися металлическими частицами.

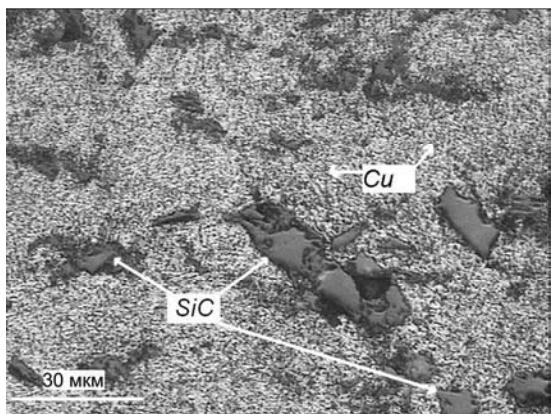


Рис. 13. Микрофотографии шлифа покрытия медь – карбид кремния.

В связи с этим, для керамических частиц определяющим параметром, влияющим на процесс взаимодействия с подложкой, является скорость удара. Поэтому в предложенном способе подача керамического порошка осуществляется в сверхзвуковую область сопла. Это позволяет избежать эрозии стенок сопла в критическом сечении и при этом разогнать керамические частицы до высоких скоростей. Подача металлического порошка осуществляется в

дозвуковую область потока с целью эффективного прогрева частиц и последующего их ускорения. На примере смесей алюминий - карбид кремния, алюминий – оксид алюминия, медь – карбид кремния, медь – оксид алюминия было проведено экспериментальное исследование, доказывающее эффективность применения данного метода для нанесения металлокерамических покрытий. В качестве типичного примера микроструктуры полученных металлокерамических покрытий на рис. 13 представлен микрошлиф покрытия медь – карбид кремния.

При реализации экспериментов с напылением металлокерамических покрытий был выявлен эффект «активирующего» воздействия керамического порошка на процесс напыления смесей. То есть коэффициент напыления металлокерамической смеси может быть выше, чем коэффициент напыления чистого металла (рис. 14).

С физической точки зрения активационное влияние керамического порошка объясняется, во-первых, тем, что удар керамической частицы вызывает очистку поверхности.

Это улучшает условия для образования связей между частицей и подложкой при последующем ударе в эту же поверхность металлической частицы. Соответственно вероятность закрепления металлической частицы на подобной «активированной» поверхности увеличивается. Во-вторых, удары керамических частиц создают развитую шероховатость на поверхности преграды, что увеличивает площадь контакта между ударяющейся

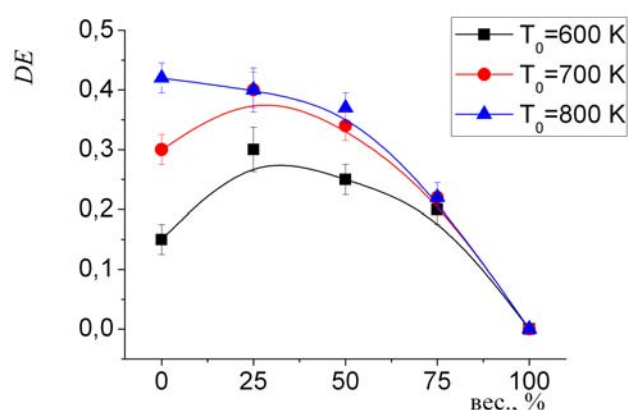


Рис. 14. Зависимость коэффициента напыления смеси меди и карбида кремния от процентного состава смеси.

металлической частицей и подложкой, и, следовательно, вероятность закрепления металлической частицы на подложке возрастает.

Эксперименты продемонстрировали также зависимость уровня активационного воздействия от размеров керамических частиц. В частности, показано, что по мере увеличения размера керамических частиц коэффициент напыления смеси падает и может оказываться ниже, чем коэффициент напыления чистого металла. То есть по мере увеличения размера

керамических частиц их эрозионное воздействие начинает превалировать над активационным.

Кроме того, предложено рассмотреть еще один возможный механизм активирующего воздействия керамических частиц на процесс напыления. Данный механизм заключается в активации металлических частиц за счет столкновения их с керамическими частицами в потоке. Это приводит к очистке поверхностного слоя металлических частиц от оксидных слоев, что увеличивает вероятность их закрепления на подложке.

Была разработана модель, позволяющая проводить оценки вероятности столкновения металлических частиц с керамическими непосредственно в газовом потоке. Согласно этой модели, вероятность столкновения металлической частицы с керамической рассчитывается по соотношению

$$\frac{dN_m^*}{N_m} = 1 - \exp\left(-\frac{G_{pa} \pi (d_{pm} + d_{pa})^2}{4m_{pa}} \int_{L_0}^{L_1} \left| \frac{1}{v_{pa}} - \frac{1}{v_{pm}} \right| \frac{dz}{S_{ex}}\right)$$

Среднее число соударений можно оценить как

$$I = \left(-\frac{G_{pa} \pi (d_{pm} + d_{pa})^2}{12m_{pa}} \int_{L_0}^{L_1} \left| \frac{1}{v_{pa}} - \frac{1}{v_{pm}} \right| \frac{dz}{S_{ex}} \right),$$

(N_m^* – число активированных металлических частиц, N_m – общее число металлических частиц, N_a – число абразивных частиц, v_{pm} – скорость металлических частиц, v_{pa} – скорость абразивных частиц, α – число столкновений, G_{pa} – массовый расход керамических частиц, d_{pm} – размер металлических частиц, d_{pa} – размер керамических частиц, S_{ex} – площадь сечения, $L_1 - L_0$ – расстояние между точкой инъекции абразивного порошка и выходом сопла, z – осевая координата сопла).

На основе этой модели были проведены расчеты вероятности столкновения металлических и керамических частиц в зависимости от их размера и от расположения точки ввода керамического порошка в поток. Параметры сопла и газа, использовавшиеся в расчетах приведены ниже.

Геометрические параметры сопла, используемые в расчете	
Диаметр критического сечения, мм	3
Выходной диаметр, мм	6
Дистанция напыления, мм	30
Длина сужающейся части, мм	100
Длина расширяющейся части, мм	20

Металл инжестировался в дозвуковую область сопла, а абразив - в различные области, находящиеся на оси и отстоящие от входа в сопло на расстояние по 0, 20, 40, 70 и 100 мм. Расчеты показывают, что разность скоростей между керамическими и металлическими частицами может достигать нескольких сотен метров в секунду. В качестве примера результатов расчетов на рис. 15 и 16 представлены разность скорости между частицами алюминия 25 мкм и карбида кремния различных размеров, а также вероятности их соударения в зависимости от координаты ввода порошка карбида кремния в поток. При расчете учитывались только высокоскоростные соударения ($v_{pm} - v_{pa} \geq 50$ м/с), которые предположительно могут приводить к очистке поверхности металлической частицы.

Оценка среднего числа соударений каждой металлической частицы с керамическими частицами показывает, что при использовании мелких порошков

абразива с типичными для ХГН расходами, число соударений может достигать десяти и более (рис. 17). Из рис. 15 – 17 видно, что наиболее выгодным с точки зрения столкновительной активации является инъекция мелкого порошка абразива размером сразу за критическим сечением

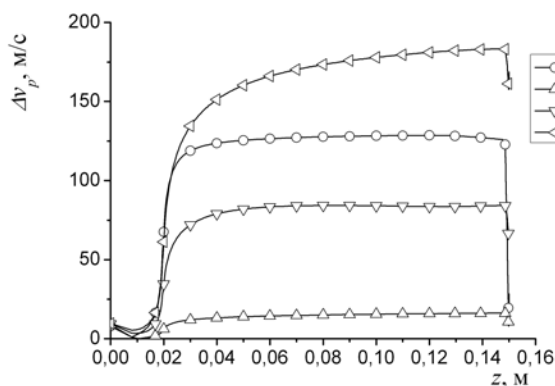


Рис. 15. Скорость движения частиц карбида кремния относительно частиц алюминия по оси газодинамического тракта.

Размеры частиц карбида кремния: 5 (1), 15 (2), 45 (3), 135 (4) мкм; $p_0 = 2,1$ МПа, $T_0 = 500$ К.

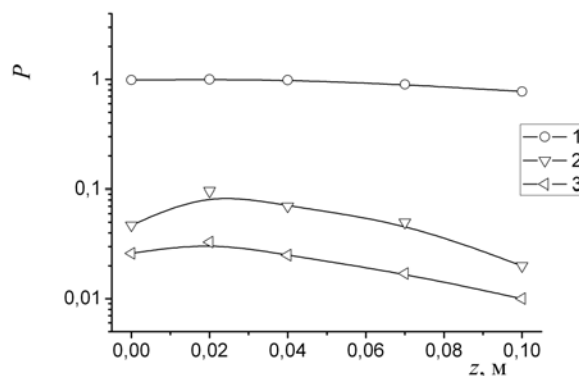


Рис. 16. Вероятность соударения частицы алюминия с абразивом.

Размеры частиц карбида кремния: 5 (1), 45 (2), 135 (4) мкм; $p_0 = 2,1$ МПа, $T_0 = 500$ К.

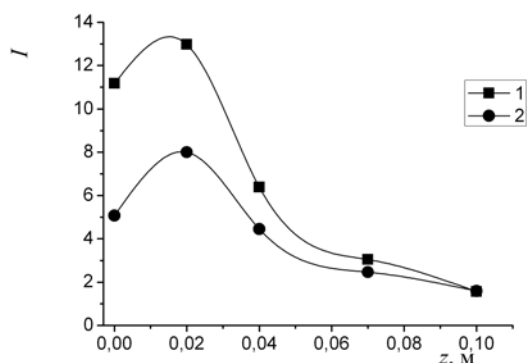


Рис. 17. Зависимость числа соударения от координаты инъекции абразива в сопло.

1 – частиц карбида кремния 5 мкм и частицами меди, $p_0 = 2,1$ МПа, $T_0 = 700$ К; 2 – частиц карбида кремния 5 мкм и частицами алюминия, $p_0 = 2,1$ МПа, $T_0 = 500$ К.

покрытий с отдельной инъекцией каждого напыляемого компонента в различные области сопла с целью оптимального нагрева и ускорения частиц каждого порошка. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволяют говорить об эффективности разработанного способа холодного газодинамического напыления многокомпонентных покрытий.

В заключении приводятся основные результаты диссертации, которые состоят из следующих положений

1. Экспериментально и теоретически показано, что в условиях ХГН скорость и температура микродисперсных частиц перед соударением с преградой в значительной степени зависят от того, в какую область потока в сопле Лаваля - дозвуковую или сверхзвуковую - они инжектированы.

2. Впервые предложен способ холодного газодинамического напыления многокомпонентных металлических

3. Перспективным направлением развития разработанного способа холодного газодинамического напыления смесей металлических порошков является применение независимого предварительного прогрева каждого напыляемого компонента с помощью дополнительных нагревателей.

4. Впервые предложен способ холодного газодинамического напыления многокомпонентных металлокерамических покрытий с инъекцией металлических порошков в дозвуковую, а керамических в сверхзвуковую области сопла.

5. С помощью разработанного метода экспериментально исследованы некоторые особенности процесса формирования металлокерамических покрытий. Выявлен эффект активирующего влияния керамического порошка на процесс напыления металлического порошка, напыляемого в смеси с керамическим порошком. Экспериментально определено влияние процентного содержания керамики и размера керамических частиц на коэффициент напыления смеси.

Основное содержание диссертации отражено в работах:

1. Косарев В.Ф., Клинков С.В., Сова А.А. Исследование эжекторной схемы формирования гетерогенных потоков в условиях холодного газодинамического напыления // Теплофизика и аэромеханика. 2006. Т. 13, № 3. С. 359-368.
2. Kosarev V., Klinkov S., Sova A. Recently patented facilities and applications in cold spray engineering // Recent Patents on Engineering. 2007. Vol 1. P. 35-42.
3. Klinkov S.V., Kosarev V.F., Sova A.A., Smurov I. Deposition of cold spray multicomponent coatings // Surface and Coatings Technology. 2008. Vol. 202. P. 5858 – 5862.
4. Klinkov S.V., Kosarev V.F., Sova A.A., Smurov I. Calculation of particle parameters for cold spraying of metal-ceramic mixtures // Journal of Thermal Spray Technology. 2009. Vol. 18. P. 944-956.
5. Sova A., Papyrin A., Smurov I. Influence of ceramic powder size on process of cermet coating formation by Cold Spray // Journal of Thermal Spray Technology. 2009. Vol. 18. P. 633-641.
6. Патент РФ № 2353705. Способ газодинамического напыления порошковых материалов и устройство для его реализации / Алхимов А.П., Косарев В.Ф., Клинков С.В., Лаврушин В.В., Сова А.А., Лаже Б., Бертран Ф., Смуров И // БИПМ. 2009. № 12.
7. Патент РФ № 2334827. Устройство газодинамического напыления порошковых материалов / Косарев В.Ф., Клинков С.В., Лаврушин В.В., Сова А.А. // БИПМ. 2008. № 27.
8. European Patent № 1 925 693 A2. Method and device for coating / Alkhimov A.P., Kosarev V.F., Klinkov S.V., Lavrushin V.V., Sova A.A., Laget B., Bertrand P., Smurov I. // European Patent Bulletin. 2008. № 22.
9. Сова А.А. Применение эжекторного сопла для холодного газодинамического напыления // XLII Международная научная студенческая конференция: тезисы докладов. Новосибирск: НГУ, 2004. С. 33.
10. Сова А. Эжекторная схема формирования гетерогенных сверхзвуковых потоков в условиях ХГН // 12-я Всероссийская научная конференция студентов-физиков: тезисы докладов, 2006, Новосибирск. Новосибирск: НГУ, 2006. С. 687.

11. Косарев В.Ф., Клинков С.В., Сова А.А., Эжекторная схема формирования гетерогенных сверхзвуковых потоков в условиях ХГН // IX Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике: тезисы докладов, Нижний Новгород, 22 – 28 августа 2006, Нижний Новгород: НИЦМ, 2006. С. 105.
12. Klinkov S.V., Kosarev V.F., Sova A.A. Abrasive admixture activation of erosion-adhesion transition at cold spray // Intern. Conf. on the Methods of Aerophys. Research: Proc. Pt 4. Novosibirsk: Parallel, 2007. P. 55 - 59.
13. Klinkov S.V., Kosarev V.F., Sova A.A. The features of ejector cold spray nozzle design and application // Intern. Conf. on the Methods of aerophys. Research: Proc. Pt 4. Novosibirsk: Parallel, 2008. P. 60 - 65.
14. Papyrin A., Kosarev V., Klinkov S., Sova A., Smurov I. and Bertrand P. Investigation of composites: metal – ceramics and metal – metal coatings produced with cold spray equipment with ejector // 2008 Thermal Spray Conf.: Proc., Maastricht [Netherlands], June 2 – 4, 2008. Maastricht: ASM International, 2008. P. 611 – 615.
15. Kosarev V.F., Klinkov S.V., Sova A.A. Composite cold spray coatings of metal-abrasive mixture: particle concentration and size influence // Intern. Conf. on the Methods of Aerophys. Research: Abstracts. Pt II. Novosibirsk: Parallel, 2008. P. 98 – 99.
16. Kosarev V.F., Klinkov S.V., Sova A.A. Composite cold spray coatings of metal-abrasive mixture: particle velocity and temperature estimation // Intern. Conf. on the Methods of aerophys. Research: Abstracts Pt II. Novosibirsk: Parallel, 2008. P. 100 – 101.
17. Kosarev V.F., Klinkov S.V., Sova A.A. Helium carried particle velocity and temperature calculation in microchannel of uniform cross section // Intern. Conf. on the Methods of Aerophys. Research: Abstracts. Pt II. Novosibirsk: Parallel, 2008. P. 233 – 234.

Ответственный за выпуск А.А. Сова

Подписано в печать 14.01.2010

Формат бумаги 60 × 84/16, Усл. печ. л. 1.0,
Уч.-изд. л. 1.0, Тираж 100 экз., Заказ № 2

Отпечатано в типографии ООО «Нонпарель»
630090, Новосибирск, Институтская, 4/1