

УДК 532.5:621.793

Исследование взаимодействия газа и частиц с преградой, состоящей из подложки и маски с конической сужающейся или расширяющейся апертурой, в условиях холодного газодинамического напыления*

С.В. Клинков, В.Ф. Косарев, С.Ю. Усынин, В.С. Шикалов

*Институт теоретической и прикладной механики
им. С.А. Христиановича СО РАН*

E-mail: usynin.serega@yandex.ru

В статье представлены результаты экспериментов и расчетов по изучению закономерностей взаимодействия высокоскоростного потока газа и частиц со сложной преградой, состоящей из подложки с установленной перед ней перегородкой, содержащей коническую сужающуюся или расширяющуюся апертуру, в условиях холодного газодинамического напыления. Численное моделирование проводилось с помощью программного пакета ANSYS Fluent в режиме движения одиночных частиц (т.е. без учета влияния частиц на параметры газового течения). Также проведено сравнение с результатами исследования взаимодействия таких потоков с преградой, содержащей цилиндрические апертуры.

Ключевые слова: холодное газодинамическое напыление, преграда, подложка, маска, порошок, сверхзвуковой двухфазный поток.

Введение

Использование масок при холодном газодинамическом напылении (ХГН) позволяет сравнительно быстро и эффективно управлять размерами пятна напыления и, как следствие, напылением на изделие заданной геометрии. Простейшей разновидностью является маска в виде пластины с отверстием заданного диаметра. Она устанавливается на некотором расстоянии от изделия, на которое наносится напыление, что приводит к формированию достаточно сложного течения, влияющего в общем случае на параметры частиц (скорость и температуру) и, соответственно, на процесс напыления. Такого вида течения, состоящие из газа и частиц, недостаточно изучены в настоящее время. В работе [1] был проведен обзор литературы [2–17] по данной теме применительно к условиям ХГН и показаны результаты исследования (полученные при численном

* Работа выполнена в рамках государственного задания ИТПМ СО РАН (№ гос. регистрации: 124021500014-4), эксперименты по напылению и профилометрия покрытий выполнены с использованием оборудования ЦКП «Механика» (ИТПМ СО РАН).

моделировании с помощью программного пакета ANSYS Fluent, а также в экспериментах течения для маски с отверстиями разного диаметра в диапазоне 1–4 мм, отстоящих от подложки, выполненной в виде плоской пластины, в диапазоне размеров 2–8 мм. В частности, было показано хорошее совпадение численных и экспериментальных картин течения и обнаружено, что установка маски перед преградой может приводить как к уменьшению скорости удара частиц о поверхность подложки, так и к ее увеличению по сравнению со случаем напыления без маски. Настоящая работа является продолжением исследований [1]. Здесь изучаются отверстия переменного сечения в виде усеченного конуса, ось которого параллельна скорости натекающего потока газа и частиц. Рассматриваются два варианта: расширяющийся и сужающийся конусы. Расширяющиеся каналы могут служить дополнительной ступенью для ускорения частиц непосредственно перед поверхностью напыляемой преграды. Сужающиеся каналы могут служить своего рода фокусирующим устройством, позволяющим собрать и сфокусировать поток частиц на поверхности напыляемого изделия. Кроме того, в процессе длительного напыления с помощью маски без замены ее фронтальной поверхности (обращенной к натекающей струе), как правило, образуется покрытие в виде сужающегося конического канала. Образование этого канала изменяет геометрию маски и может оказывать влияние на процесс напыления. Однако на сегодняшний день в литературе нет никаких данных по этому вопросу, поэтому изучение использования масок с сужающимися и расширяющимися апертурами конической формы в условиях ХГН остается актуальным.

Экспериментальная установка и методы исследований

Сверхзвуковая струя формировалась с помощью осесимметричного сопла Лавалья с длиной сверхзвуковой части 145 мм и диаметрами критического и выходного сечений $d_{cr} = 2,8$ мм и $d_{ex} = 6,5$ мм соответственно.

В качестве масок в экспериментах по напылению использовались латунные пластины толщиной $\delta_m = 2$ мм. Было изготовлено шесть масок с 20-ю апертурами в каждой (три — с цилиндрическими апертурами размером 0,94, 2,12 и 4,04 мм и три — с коническими апертурами размером 0,92–1,44, 2,01–2,80 и 4,01–4,81 мм). Дистанция установки маски от поверхности подложки (латунные пластины) составляла $l_{ms} = 4$ мм, от среза сопла до подложки — $l_{ns} = 30$ мм. Подложки перед напылением подвергались струйно-абразивной обработке (размер абразива Al_2O_3 — 300 мкм, $R_a = 12$ мкм).

Поток из сопла направлялся перпендикулярно поверхности подложки, сопло перемещалось соосно с отверстием в маске со скоростью 100 мм/с, температура торможения и давление воздуха в форкамере сопла были равны 573 К и 3,75 МПа соответственно. При напылении использовался алюминиевый порошок АСД-1 со средним размером частиц 30 мкм.

Поверхность покрытий исследовалась с помощью оптического микроскопа StereoDiscovery V12 (Carl Zeiss, Германия) и бесконтактного интерференционного профилометра Contour GT-K1 (Bruker, Германия). По результатам многократных измерений (до 20) были получены усредненные профили пятен напыления.

Метод расчета

Параметры расчета по большей части совпадают с параметрами, использованными в работе [1]. Расчет проводился с помощью программного комплекса ANSYS. Геометрия модели, которая выбиралась в соответствии с проведенными экспериментами, представлена на рис. 1. Расчетная сетка состояла из 180 000 элементов. Для нахождения стационарного газового течения, использовалась модель турбулентности $k-\omega$ SST. Теплообмен

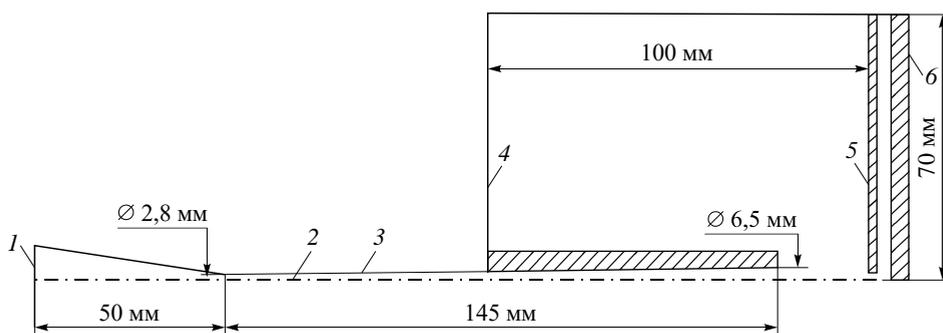


Рис. 1. Геометрические параметры расчетной модели.

1 — входная граница, 2 — ось симметрии, 3 — стенка сопла, 4 — выходная граница,
5 — поверхность маски, 6 — поверхность подложки.

между газом и поверхностями сопла, маски и подложки не учитывался. В соответствии с условиями экспериментов температура торможения основного рабочего (ускоряющего частицы) воздуха была задана 573 К, давление торможения — 3,75 МПа. Струя истекала в атмосферу с давлением воздуха 0,1 МПа и температурой 300 К.

Поскольку при напылении объемные концентрации частиц малы (менее 10^{-3}) моделирование проводилось в приближении одиночных частиц, когда их влиянием на газ можно пренебречь [18]. В соответствии с характерными размерами частиц алюминиевого порошка АСД-1, использовавшегося при напылении, моделировалось движение частиц диаметрами от 5 до 50 мкм. Частицы вводились в форкамеру сопла с начальной температурой 300 К и скоростью 10 м/с на расстоянии 45 мм выше критического сечения по оси сопла. При расчете распределения скорости удара в зависимости от радиуса удара частиц по поверхности подложки частицы вводились на срезе сопла на разных радиусах от оси. В этом случае начальные параметры частиц выбирались равными параметрам, полученным при их введении в форкамеру сопла по оси. Поскольку выполненные ранее оценки действующих на частицу сил показали, что такие силы, как гравитационная, термофореза, Магнуса, Басси, присоединенной массы, намного меньше силы сопротивления [18], то при расчете учитывалась только сила сопротивления. Для этого использовалась заложенная в пакете ANSYS Fluent опция, известная как закон сопротивления для сферических частиц с поправкой на числа Маха частицы выше 0,4 [19].

Необходимо отметить, что в расчете не учитывались столкновения частиц с краями апертуры и между собой, а также турбулентное воздействие на частицы со стороны газового течения.

Результаты экспериментов

Было проведено напыление образцов, затем сделаны фотографии общего вида полученных покрытий, вслед за этим была выполнена их профилометрия. На рис. 2 в качестве примера приведены характерные фотографии покрытий, напыленных через маску. Ниже (рис. 3 и 4) показаны результаты профилометрии пятна напыления.

В большинстве случаев покрытие оказалось толщиной в пределах от 100 до 300 мкм с диаметром, немного большим (в 1,1–1,3 раза) диаметра апертуры (рис. 4). Стандартное отклонение толщины покрытия составило $\pm 20\%$, что связано с неконтролируемым изменением расхода порошка во время эксперимента. Для сравнения на рис. 4 представлен также профиль дорожки покрытия (в пределах ± 2 мм от центральной линии) в отсутствие маски. Обращает на себя внимание профиль, полученный с использованием

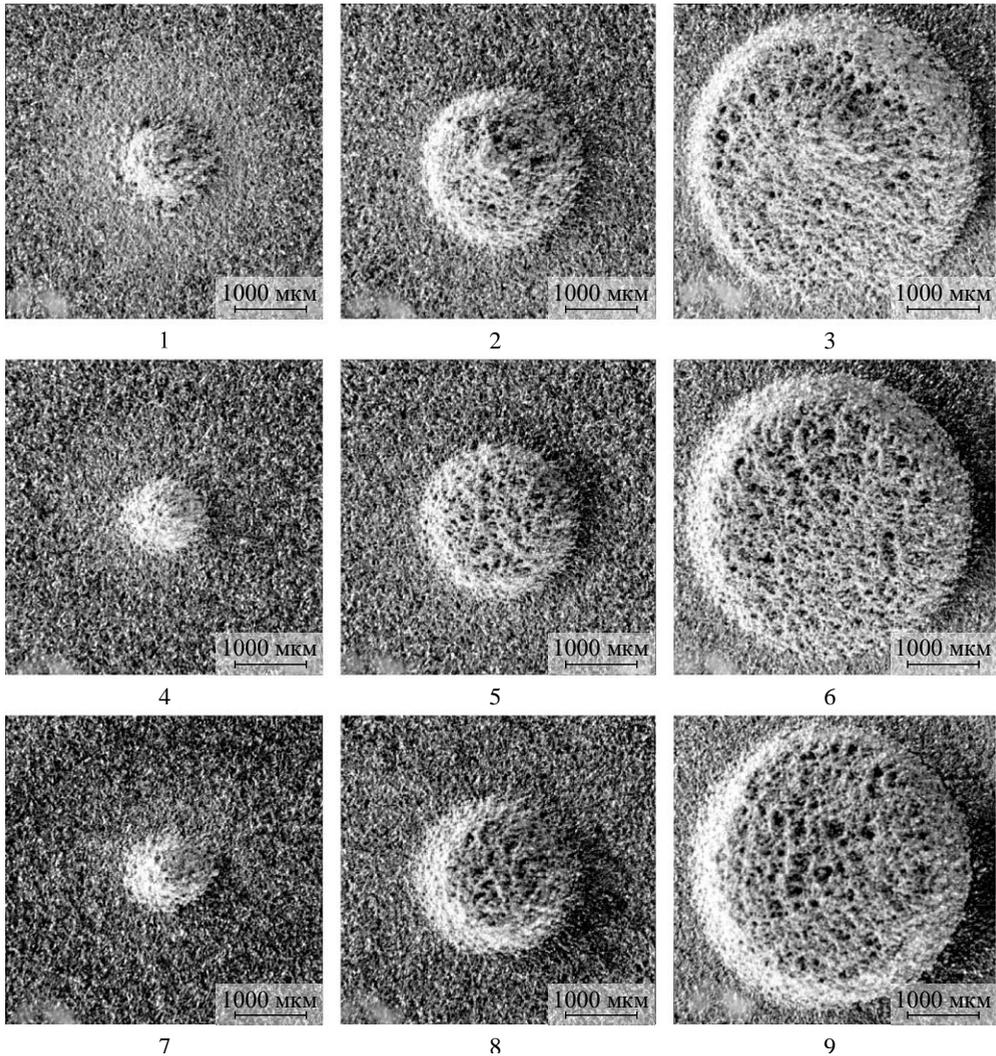


Рис. 2. Фотографии зоны покрытия на подложке с установленной перед ней маской с апертурой в виде сужающегося (1–3) и расширяющегося (4–6) конусов, а также канала постоянного сечения (7–9).

конической сужающейся апертуры диаметром 2 мм. Его высота вблизи оси симметрии намного превосходит среднюю толщину остальных покрытий. Возможным объяснением этого факта является фокусировка частиц при использовании конических сужающихся апертур (см. далее раздел «Обсуждение»).

Результаты расчетов

Как и в работе [1], на предварительном этапе были проведены серии расчетов и сравнение с результатами теневой визуализации при натекании потока газа на преграду с установленной перед ней маской, содержащей одиночные конические сужающиеся и расширяющиеся каналы. Для краткости эти данные здесь не приводятся, однако важно отметить, что смоделированная картина течения воспроизводит экспериментально полученные теневые изображения. В настоящей работе ниже будут представлены результаты

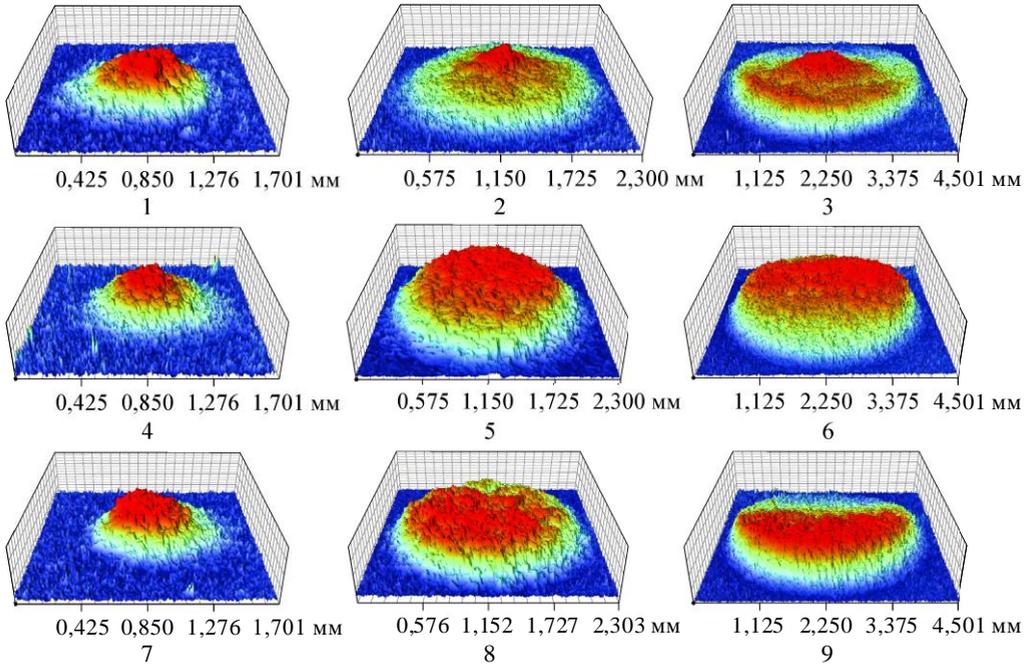


Рис. 3. Трехмерные профилограммы пятна напыления после маски с апертурой в виде сужающегося (1–3) и расширяющегося (4–6) конусов, а также канала постоянного сечения (7–9).

моделирования в условиях, близких к напылению, т.е. в условиях, когда теневая визуализация крайне затруднительна и не проводилась.

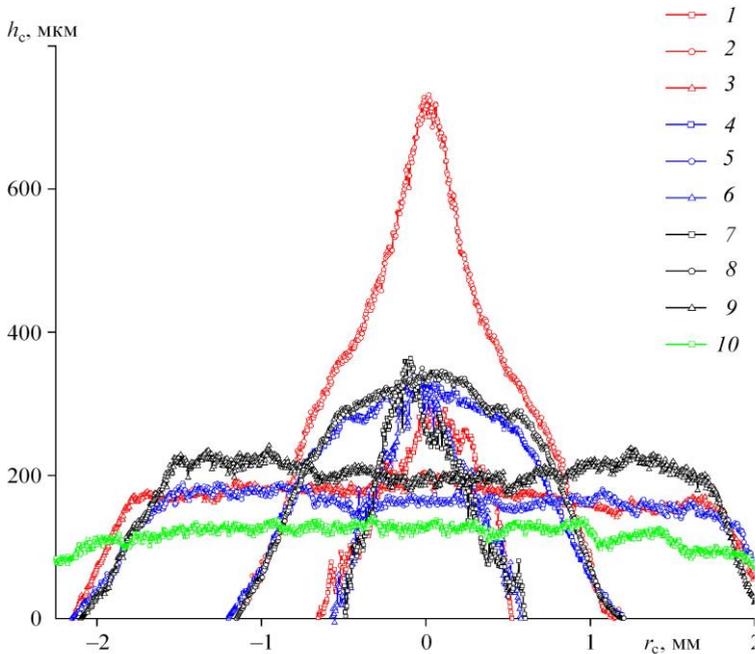


Рис. 4. Усредненные профили пятна напыления после маски с апертурой в виде сужающегося (1–3) и расширяющегося (4–6) конусов, канала постоянного сечения (7–9), а также дорожки напыления без маски (10).

h_s — высота покрытия, r_c — радиус пятна напыления.

На рис. 5 в качестве примера показаны рассчитанные картины течения газа (градиенты плотности) в окрестности подложки с установленной перед ней маской с коническими сужающимися и расширяющимися апертурами разного диаметра, а также с апертурой постоянного сечения. В последнем случае рассматривалась маска толщиной 2 мм, отстоящая от поверхности подложки на расстоянии $l_{ms} = 4$ мм. Как видно, при апертурах диаметром менее 4 мм перед поверхностью маски возникает прямая ударная волна, а при диаметре около 4 мм образуется более сложная комбинация, состоящая из косых и прямой ударных волн, причем в случаях расширяющейся и постоянной по сечению апертуры прямой скачок оказывается внутри маски. Часть газа течет по поверхности маски, а другая часть проходит через апертуру и создает сверхзвуковую струю, направленную к поверхности подложки. Эта струя снова замедляется за новой ударной волной, которая появляется уже перед поверхностью подложки.

На рис. 6 приведены распределения статического давления вдоль оси газового потока. Видно, что почти во всех случаях давление во вторичной струе (струе, вытекающей

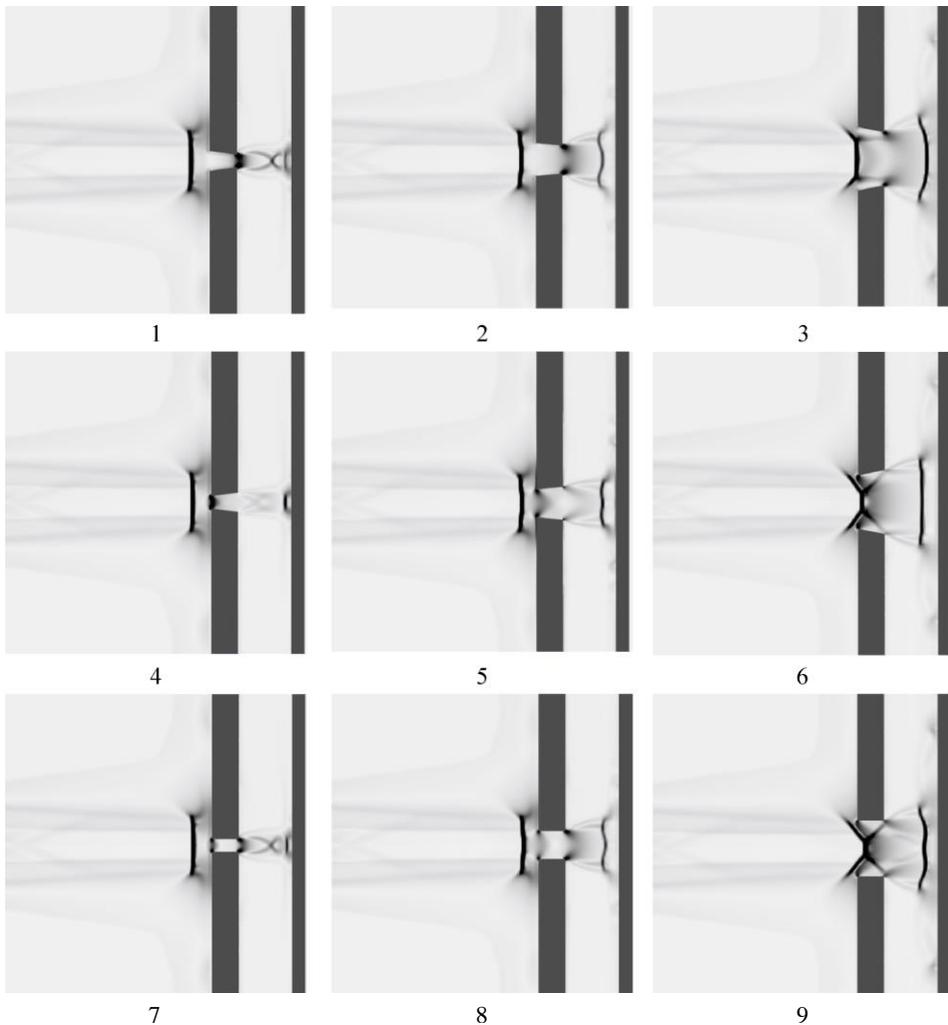


Рис. 5. Примеры картин течения в окрестности подложки с установленной перед ней маской (толщиной 2 мм) с одиночной апертурой в виде сужающегося (1–3) и расширяющегося (4–6) конусов, а также канала постоянного сечения (7–9). Расстояние между задней стенкой маски и поверхностью подложки $l_{ms} = 4$ мм.

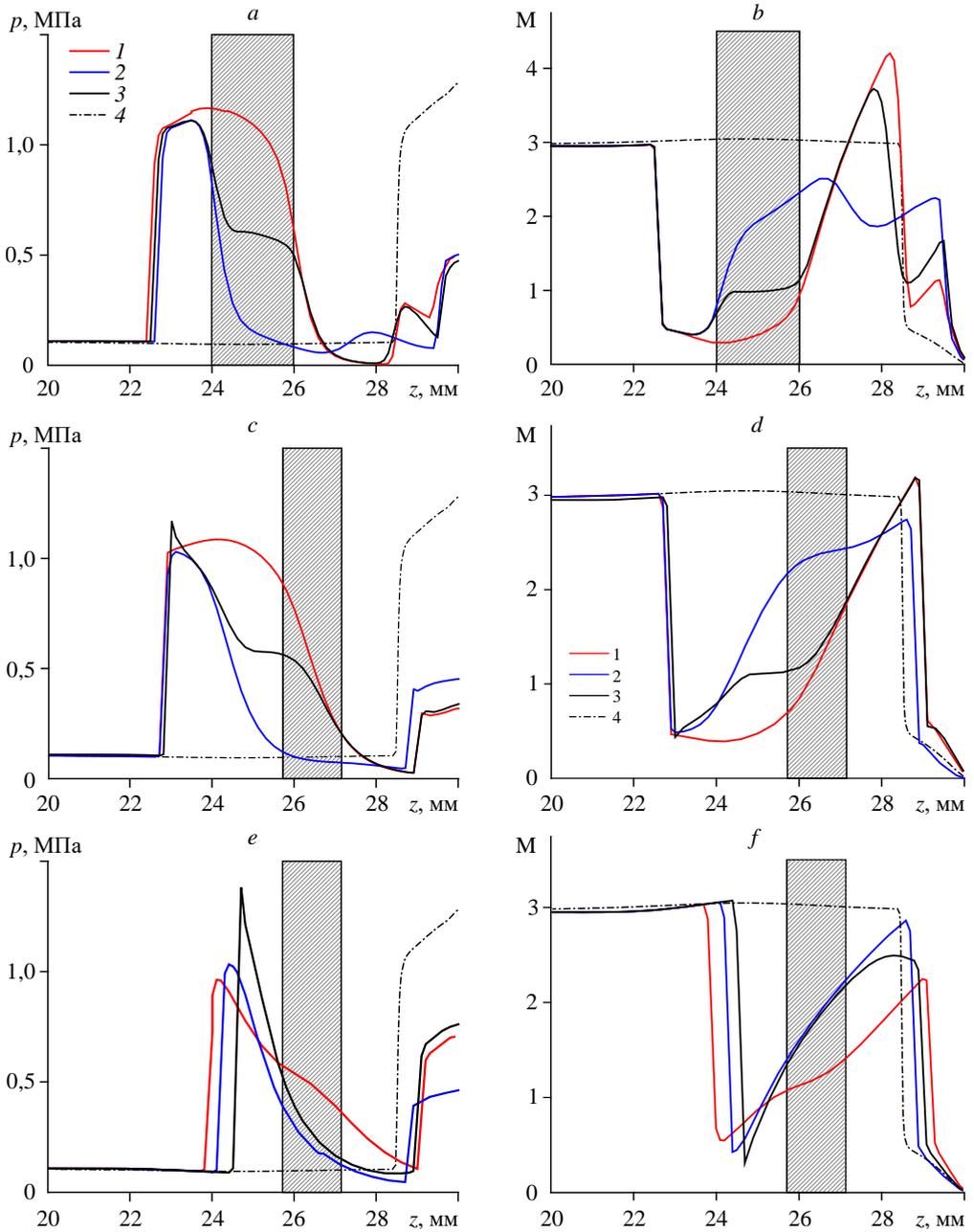


Рис. 6. Изменение статического давления (*a*, *c*, *e*) и числа Маха (*b*, *d*, *f*) вдоль оси газового течения для конфигураций, представленных на рис. 5, а также для случая натекания без маски. 1–3 — сужающаяся и расширяющаяся апертуры, а также апертура постоянного сечения соответственно, 4 — натекание газовой струи на подложку без установки маски.

из канала в маске; см. величину статического давления при значении продольной координаты 26 мм) заметно выше атмосферного. Исключением является случай с расширяющейся апертурой диаметром 1 мм, здесь давление примерно равно атмосферному. Это означает, что можно было бы увеличить степень расширения каналов больших диаметров для получения расчетной (с давлением, близким к атмосферному) вторичной струи.

Заметим, что данные расчета качественно подтверждают выводы, которые можно сделать на основе известных закономерностей одномерных течений. Так, для сужающегося канала критическая скорость (в данном случае около 440 м/с) должна достигаться ближе к выходу канала, а для расширяющегося — наоборот, ближе к входу. Именно такая картина проявляется для случая перфорации диаметром 1 мм (рис. 6*b*). Однако с увеличением диаметра перфорации наблюдается отклонение от этих закономерностей. Так, например, для перфорации диаметром 4 мм сверхзвуковой переход наблюдается примерно на расстоянии 2/3 толщины маски вглубь (рис. 6*f*), причем для всех трех рассмотренных случаев. Это, скорее всего, связано с неоднородностью течения в каналах сравнительно больших диаметров (напомним, что здесь представлены случаи с длиной канала 2 мм, который равен толщине маски).

Обращает на себя внимание тот факт, что при малых диаметрах перфорации (1 и 2 мм) подъем давления после первой ударной волны (перед маской) почти одинаков во всех случаях (рис. 6*a*, 6*c*). Однако для случая перфорации диаметром 4 мм его величина и положение зависят от геометрии канала (рис. 6*e*). Также важно отметить, что подъем давления за второй ударной волной (перед подложкой, что соответствует значению продольной координаты 30 мм) во всех случаях заметно ниже, чем в случае натекания струи без маски. Как отмечалось в ранее опубликованной работе [1], это приводит к более низкой плотности газа и, соответственно, меньшему торможению частиц в зоне за этой второй ударной волной. В результате в ряде случаев может быть получена более высокая скорость удара частиц по сравнению с классическим случаем без маски.

Расчет скорости частиц

На рис. 7 показаны результаты расчета скорости удара алюминиевых частиц разного диаметра при их движении вдоль оси симметрии течения для конфигураций, представленных на рис. 5, а также для конфигураций без маски. Как отмечалось в работе [1],

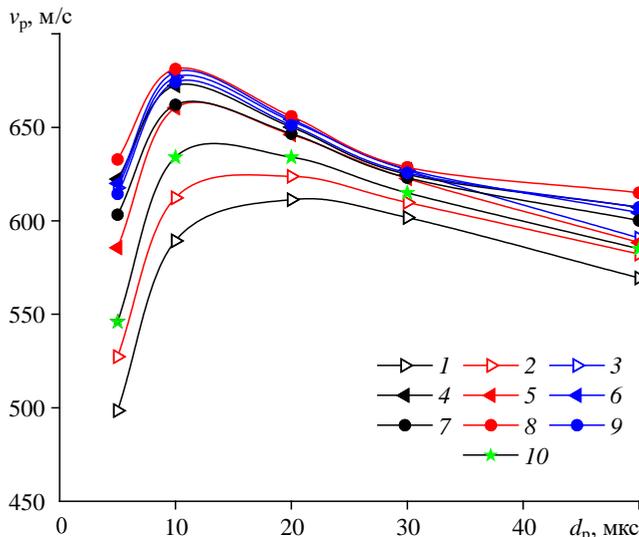


Рис. 7. Зависимость скорости удара алюминиевых частиц от их диаметра для разных минимальных диаметров отверстий в маске.

1, 4, 7 — минимальный диаметр 1 мм; 2, 5, 8 — 2 мм; 3, 6, 9 — 4 мм;
1–3 — сужающаяся апертура, 4–6 — расширяющаяся апертура,
7–9 — апертура постоянного сечения, 10 — случай без маски.

кривые зависимости скорости удара частиц от их диаметра качественно имеют схожий вид: немонотонное изменение с максимумом при размере частиц в диапазоне от 10 до 20 мкм. Однако сама величина скорости удара частиц зависит от геометрии маски. Как отмечалось ранее, из-за сложной системы ударных волн плотность газа в окрестности подложки оказывается заметно ниже в случаях с маской, чем в случае без маски. Это может привести к меньшему торможению частиц и, соответственно, более высокой скорости удара. Отметим, что почти во всех рассмотренных вариантах это так и есть. Исключением являются случаи маски с сужающимся каналом диаметром 1 мм и 2 мм. Причины этого можно продемонстрировать на примере сужающейся апертуры диаметром 1 мм (рис. 8). Как видно, в сужающемся канале первая низкоскоростная зона оказывается самой продолжительной (на рис. 8а она занимает положение примерно от 22 до 26 мм). Именно здесь происходит основная потеря скорости частиц (кривые 2 и 3 на рис. 8а). Для сравнения на рис. 9б приведено изменение скорости для расширяющегося канала. Видно, что эта же зона оказывается существенно короче и, соответственно, потеря скорости частиц здесь заметно меньше. Отметим, что средний размер порошка АСД-1 составляет около 30 мкм. Рис. 7 показывает, что разность скоростей удара частиц этого диаметра при пролете разных конфигураций очень мала — менее 3%. Следовательно, установка маски не должна существенно влиять на процесс напыления этих и еще более крупных частиц. Основное влияние, как можно видеть, оказывается на мелкие частицы.

Чтобы представить распределение скорости удара от радиуса удара были проведены расчеты с вводом частиц на разных расстояниях от оси (рис. 9). Частицы вводились на срезе сопла, при этом начальные параметры частиц были получены при расчете их движения по оси при вводе в форкамере сопла. В работе [1] было показано, что такой подход дает результаты, близкие с результатами для случая, когда частицы вводились в форкамере сопла на разных расстояниях от оси. Из рис. 9 видно, что максимальная скорость удара не обязательно достигается на оси течения. Распределение с периферийным максимумом скорости удара наблюдается при диаметре апертуры 4 мм для сужающейся, расширяющейся апертур и апертуры постоянного сечения. Кроме того, для сужающейся апертуры, независимо от ее диаметра, распределения имеют максимум на периферии. В целом неравномерность распределения скорости удара по радиусу не превосходит 15–20%. Самая сильная неравномерность (около 19%) характерна

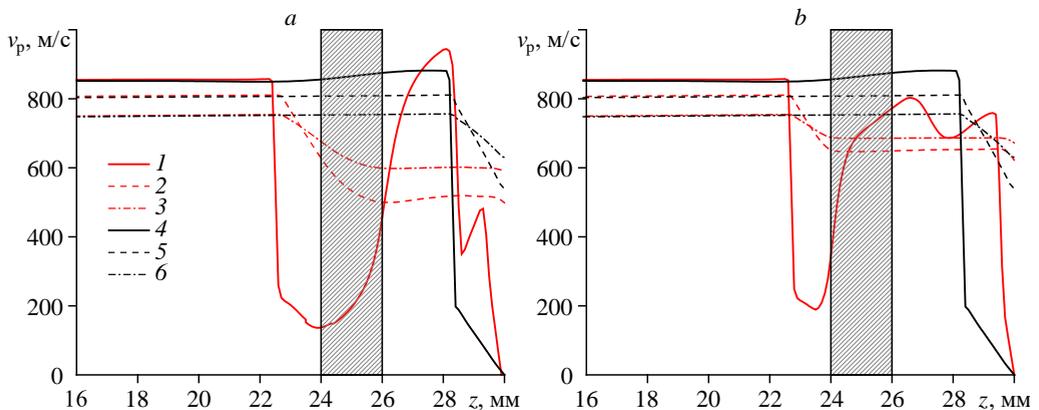


Рис. 8. Изменение скорости газа (1, 4), а также частиц диаметром 5 (2, 5) и 10 (3, 6) мкм вдоль оси течения для сужающейся (а) и расширяющейся (б) апертуры с минимальным диаметром 1 мм.

Случай с наличием маски (1–3) и без нее (4–6).

для распределения скорости удара частиц диаметром 5 мкм при прохождении сужающейся апертуры диаметром 4 мм (кривая 5 рис. 9а). Также на графиках отмечены полуценные в эксперименте фактические радиусы апертур (штриховые линии) и пятен напыления (штрихпунктирные линии). Видно, что в большинстве случаев расчет дает заметно заниженные результаты по сравнению с экспериментальными.

Обсуждение

Рассмотрим возможные объяснения фокусировки частиц при использовании конических сужающихся апертур. Рис. 10 демонстрирует, что частицы, движущиеся в кольцевой области между диаметрами входной и выходной апертур, сталкиваются с боковой поверхностью конической апертуры. Оценки показывают, что нормальная скорость удара составляет около 100 м/с и, следовательно, коэффициент восстановления нормальной скорости очень мал [20]. Например, для частиц алюминия нормальная скорость отскока будет около 5 м/с. Это позволяет предположить, что после отскока частицы движутся вдоль указанной поверхности до выходного сечения. Далее после выхода они по инерции продолжают свое движение в том же направлении, что приводит к фокусировке их на расстоянии l_f от маски. Это справедливо для сравнительно крупных частиц. Мелкие частицы после выхода будут увлекаться газом и изменять направление к движению параллельно оси струи. Это приведет к неполной фокусировке потока отскочивших частиц.

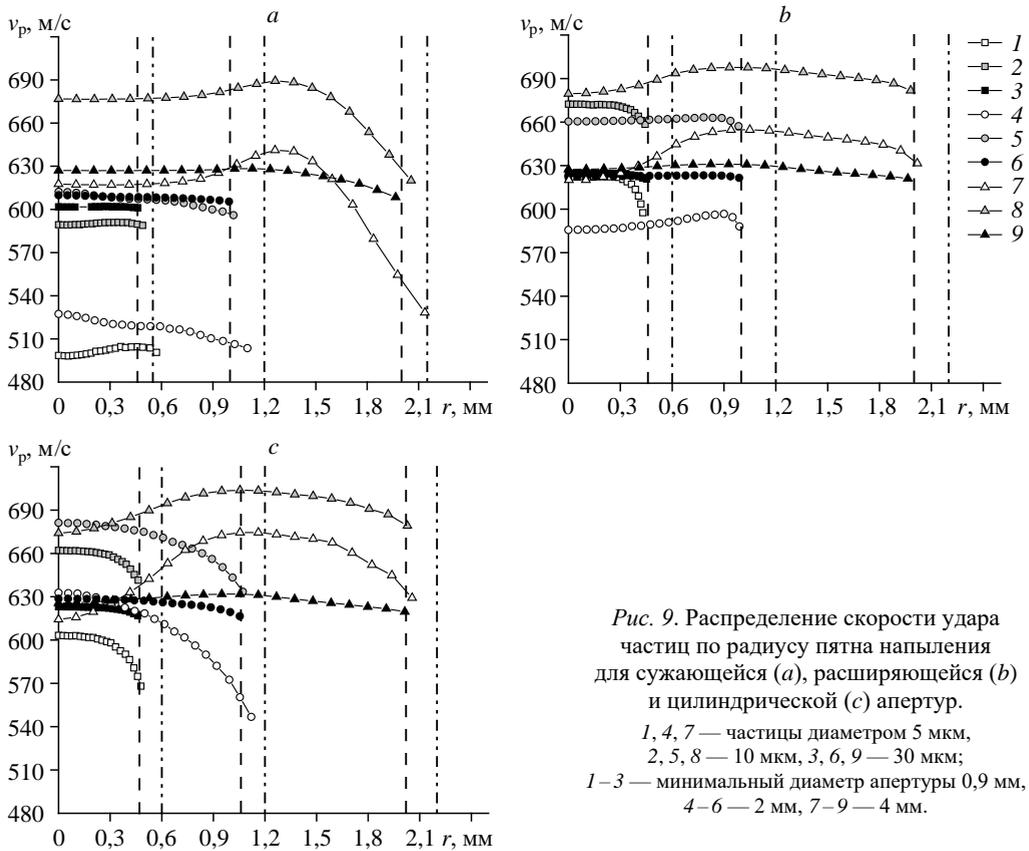
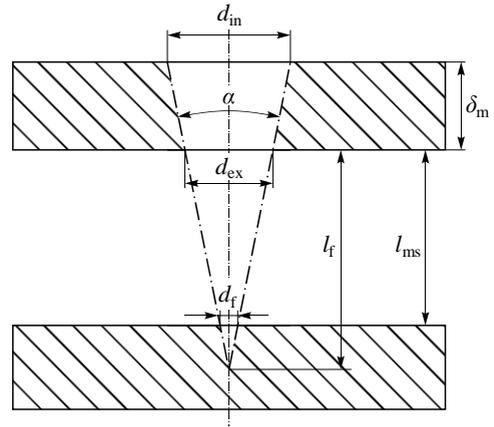


Рис. 10. Оценка эффекта фокусировки напыления у сужающейся апертуры.

d_{in} — входной диаметр апертуры, d_{ex} — выходной диаметр апертуры, d_f — диаметр пятна фокусировки на поверхности подложки, δ_m — толщина маски, l_{ms} — расстояние между маской и подложкой, l_f — расстояние от маски до точки фокуса, α — угол сужения апертуры.



Расстояние до точки фокусировки крупных частиц определяется по формуле

$$l_f = \delta_m \frac{d_{ex}}{d_{in} - d_{ex}}.$$

В общем случае подложка расположена на расстоянии l_{ms} от маски, которое может не совпадать с расстоянием фокусировки. Тогда диаметр пятна на поверхности подложки, внутри которого соберутся эти частицы, может быть определен из формулы

$$d_f = d_{ex} \frac{|l_f - l_{ms}|}{l_f}.$$

Чем ближе поверхность подложки расположена к точке фокуса, тем отчетливее проявляется эффект фокусировки. Долю частиц, пролетающих через маску без столкновения с ней, можно оценить по отношению площадей выходного и входного сечений. В этом случае доля частиц, собравшихся в пятне за счет эффекта фокусировки, может быть определена по формуле

$$k_f = 1 - \left(\frac{d_{ex}}{d_{in}} \right)^2.$$

Оценку прироста толщины покрытия за счет фокусировки Δh_{cf} можно выполнить по формуле

$$\frac{\Delta h_{cf}}{h_{c0}} = \frac{k_f}{1 - k_f} \left(\frac{d_{ex}}{d_f} \right)^2 \frac{DE_f}{DE_0},$$

здесь h_{c0} — толщина покрытия, образуемого частицами, пролетевшими через маску без столкновения, DE_0 — коэффициент напыления этих частиц, DE_f — коэффициент напыления частиц, собирающихся за счет фокусировки в пятне диаметром d_f . Эта оценка получена в предположении равномерного распределения частиц по диаметру пятна напыления. Можно ожидать, что натекающий поток частиц на маску близок к равномерному, поскольку диаметры рассматриваемых в данной работе апертур (1–4 мм) заметно меньше диаметра струи (около 8 мм). Следовательно, и поток частиц, проходящих через апертуру в маске без столкновения, тоже близок к равномерному. Что касается распределения частиц, собирающихся на подложке после столкновения со стенками апертуры в маске, то оно, вообще говоря, неизвестно и требует дополнительных исследований. Здесь для оценки оно принимается равномерным. Необходимо также сделать некоторые замечания относительно коэффициентов напыления. DE_0 можно принять равным значению при напылении покрытий без маски. Но для отскочивших частиц DE_f , очевидно, будет другим, во-первых, за счет изменения скорости удара, во-вторых,

Таблица

Приведенные параметры для конических сужающихся апертур

d_{in}/d_{ex} , мм	l_f , мм	l_f/l_{ms}	d_f , мм	d_f/d_{ex}	k_s	$\Delta h_{ef}/h_{c0}$
1,44/0,92	5,54	1,39	0,24	0,26	0,59	21
2,80/2,01	5,0	1,25	0,4	0,2	0,49	24
4,81/4,01	10,0	2,5	2,4	0,6	0,31	1,25

за счет изменения угла удара. Авторы, однако, предполагают, что эти изменения невелики. Например, оценка угла подлета к поверхности подложки указанных частиц дает значения $\operatorname{tg} \alpha \sim 0,2$, что может привести к уменьшению коэффициента напыления примерно на 10 %. Потеря скорости из-за столкновения очень мала (по оценке около 2 %) что также не приведет к существенному падению коэффициента напыления этих частиц. Однако по мере роста покрытия увеличивается угол столкновения частиц с поверхностью покрытия, что будет приводить к падению коэффициентов напыления. Здесь принимается предельный угол удара частиц, когда их коэффициент напыления близок к нулю, примерно равным 45° (эта оценка основана на дополнительных экспериментальных данных, которые не приводятся в данной работе). Другими словами, максимальная толщина покрытия не может быть больше радиуса пятна напыления, а примерно равна ему, что и наблюдается в экспериментах (рис. 4).

Значения приведенных параметров для экспериментально исследованных конических сужающихся апертур представлены в таблице. Видно, что самой показательной конфигурацией для демонстрации эффекта фокусировки является коническая апертура с диаметрами $d_{in}/d_{ex} = 2,01/2,80$ мм, что и подтверждено экспериментально.

Еще раз подчеркнем, что приведенные выше рассуждения основаны всего лишь на довольно грубых оценках. Для составления более точной картины требуются дальнейшие исследования.

Заключение

С использованием масок с апертурами различной формы были получены покрытия с диаметром, несколько большим (в 1,1 – 1,3 раза) минимального диаметра апертуры, и толщиной в пределах от 100 до 300 мкм, за исключением покрытия, полученного при использовании сужающейся апертуры с минимальным диаметром 2 мм (при диаметре натекающей струи 8 мм). Его высота вблизи оси симметрии намного (примерно в два раза) превосходит среднюю толщину остальных покрытий. Это возможно объяснить увеличением общего потока и фокусировкой части потока частиц при использовании сужающихся апертур.

Зависимости скорости удара частиц от их диаметра качественно имеют схожий вид — немонотонное изменение с максимумом для частиц диаметром от 10 до 20 мкм. Однако сама величина скорости удара частиц зависит от геометрии маски. Следует заметить, что почти во всех рассмотренных вариантах скорости удара при наличии маски выше, чем в случае без маски. Таким образом, ожидается, что установка маски не должна существенно влиять на коэффициент напыления.

Максимальная скорость удара не обязательно достигается на оси течения. Распределение с периферийным максимумом скорости удара наблюдается при большом диаметре апертуры (4 мм) независимо от того, сужается или расширяется канал, а также для сужающейся апертуры малого диаметра (1 и 2 мм). Неравномерность распределения

скорости удара по радиусу пятна напыления не превосходит 15–20 %. Самая сильная неравномерность характерна для распределения скорости удара частиц малого диаметра (5 мкм) при прохождении сужающейся апертуры большого диаметра (4 мм).

Рассчитанный радиус удара частиц в большинстве случаев дает заметно заниженные результаты по сравнению с экспериментальными.

В целом можно заключить, что проведенные исследования помогают углубить понимание закономерностей взаимодействия высокоскоростного потока газа и частиц со сложной преградой, состоящей из подложки с установленной перед ней перфорированной перегородкой.

Список литературы

1. Клинков С.В., Косарев В.Ф., Усынин С.Ю., Шикалов В.С. Исследование течения газа и частиц через маску с круглой апертурой при холодном газодинамическом напылении // Теплофизика и аэромеханика. 2023. Т. 30, № 3. С. 557–570.
2. Grund W.T., Rupprecht C., Kuemmel S., Wielage B. New method for producing power electronic circuit boards by cold-gas spraying and investigation of adhesion mechanisms // Surface & Coatings Technology. 2010. Vol. 205, No. 4. P. 1115–1118.
3. Rastjagaev E., Wilde J., Wielage B., Grund T., Küemmel S. Development and testing of cold gas sprayed circuit boards for power electronics applications // Proc. 7th Intern. Conf. on Integrated Power Electronics Systems. 2012. P. 154–159.
4. Ernst K.-R., Braeutigam J., Gaertner F., Klassen T. Effect of substrate temperature on cold-gas-sprayed coatings on ceramic substrates // J. Thermal Spray Technology. 2013. Vol. 22, No. 2–3. P. 422–432.
5. Kosarev V.F., Klinkov S.V., Melamed B.M., Nepochatov Yu.K., Ryashin N.S., Shikalov V.S. Cold spraying for power electronics: Deposition of thick topologically patterned copper layers on ceramics // AIP Conf. Proc. 2018. Vol. 2027. P. 030047-1–030047-5.
6. Непочатов Ю.К., Косарев В.Ф., Ряшин Н.С., Меламед Б.М., Шикалов В.С., Клинков С.В., Красный И.Б., Кумачева С.А. Разработка технологии нанесения толстых слоев меди на керамические материалы из оксида и нитрида алюминия // Современная электроника. 2018. № 1. С. 30–35.
7. Пат. 2687598 РФ, МПК⁵¹ C04 B41/88. Способ металлизации керамики под пайку / Непочатов Ю.К., Косарев В.Ф., Ряшин Н.С., Меламед Б.М., Шикалов В.С., Клинков С.В., Красный И.Б., Кумачева С.А.; заявитель и патентообладатель ООО «Нанокерамикс», № 2017143442; заявл. 12.12.2017; опубл. 15.05.2019. Бюл. № 14.
8. Dupuis P., Cormier Y., Farjam A., Jodoin B., Corbeil A. Performance evaluation of near-net pyramidal shaped fin arrays manufactured by cold spray // Intern. J. Heat and Mass Transfer. 2014. Vol. 69. P. 34–43.
9. Cormier Y., Dupuis P., Farjam A., Corbeil A., Jodoin B. Additive manufacturing of pyramidal pin fins: Height and fin density effects under forced convection // Intern. J. Heat and Mass Transfer. 2014. Vol. 75. P. 235–244.
10. Cormier Y., Dupuis Ph., Jodoin B., Ghaei A. Finite element analysis and failure mode characterization of pyramidal fin arrays produced by masked cold gas dynamic spray // J. Thermal Spray Technology. 2015. Vol. 24, Iss. 8. P. 1549–1565.
11. Dupuis P., Cormier Y., Fenech M., Corbeil A., Jodoin B. Flow structure identification and analysis in fin arrays produced by cold spray additive manufacturing // Intern. J. Heat and Mass Transfer. 2016. Vol. 93. P. 301–313.
12. Kim D., Park J., Lee J. Cold spray deposition of cooper electrodes on silicon and glass substrates // J. Thermal Spray Technology. 2013. Iss. 22, No. 7. P. 1092–1102.
13. Lee J.-G., Kim D.-Y., Kang B., Kim D., Song H.-E., Kim J., Jung W., Lee D., Al-Deyab S.S., James S.C., Yoon S.S. Nickel–copper hybrid electrodes self-adhered onto a silicon wafer by supersonic cold-spray // Acta Materialia. 2015. Vol. 93. P. 156–163.
14. An S., Joshi B., Yarin A.L., Swihart M.T., Yoon S.S. Supersonic cold spraying for energy and environmental applications: one-step scalable coating technology for advanced micro- and nanotextured materials // Adv. Mater. 2020. Vol. 32, Iss. 2. P. 1905028-1–1905028-34.
15. Sova A., Doubenskaia M., Grigoriev S., Okunkova A., Smurov I. Parameters of the gas-powder supersonic jet in cold spraying using a mask // J. Thermal Spray Technology. 2013. Vol. 22, No. 4. P. 551–556.
16. Клинков С.В., Косарев В.Ф., Ряшин Н.С., Шикалов В.С. Экспериментальное исследование холодного газодинамического напыления за маской. Ч. 1 // Теплофизика и аэромеханика. 2016. Т. 23, № 5. С. 765–770.
17. Клинков С.В., Косарев В.Ф., Ряшин Н.С. Сравнение результатов экспериментов и моделирования холодного газодинамического напыления за маской. Ч. 1 // Теплофизика и аэромеханика. 2017. Т. 24, № 2. С. 221–232.

18. Яненко Н.Н., Солоухин Р.И., Папырин А.Н., Фомин В.М. Сверхзвуковые двухфазные течения в условиях скоростной неравновесности частиц // Отв. ред. В.Е. Накоряков. Новосибирск: Наука, 1980. 159 с.
19. Nastic A., Jodoin B. Evaluation of heat transfer transport coefficient for cold spray through computational fluid dynamics and particle in-flight temperature measurement using a high-speed ir camera // J. Thermal Spray Technology. 2018. Vol. 27. P. 1491–1517.
20. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия / Под ред. Р.В. Гольдштейна. Пер. с англ. М.: Мир, 1989. 510 с.

*Статья поступила в редакцию 17 сентября 2024 г.,
после доработки — 17 сентября 2024 г.,
принята к публикации 8 ноября 2024 г.*