УДК 532.5; 621.793

# Исследование течения газа и частиц через маску с круглой апертурой при холодном газодинамическом напылении<sup>\*</sup>

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

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

E-mail: usynin.serega@yandex.ru

В работе представлены результаты расчетов и экспериментов по движению сверхзвуковой двухфазной струи, проходящей через круглую апертуру в маске, расположенной на различных расстояниях от подложки, в условиях холодного газодинамического напыления. Задача решалась при помощи программного пакета для расчетов гидрогазодинамических процессов ANSYS Fluent, визуализация газодинамической картины течения проводилась шлирен-методом. На примере напыления порошка алюминия выполнен анализ и сравнение полученных результатов.

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

#### Введение

В настоящее время в различных отраслях промышленности, например, в производстве силовых полупроводниковых модулей, востребованы методы нанесения покрытий с заданным рисунком. Высокий потенциал для решения данной задачи имеет метод холодного газодинамического напыления (ХГН) [1]. Он позволяет создавать слои из металлов, сплавов и композитов с высокими функциональными характеристиками. Наиболее известным способом для получения заданного рисунка покрытия является применение масок (см. например, работы [2-7], посвященные нанесению методом ХГН медных покрытий на керамические подложки из оксида и нитрида алюминия). В работах [8-11] маска в виде сетки успешно использовалась для получения пирамидальных выступов на первоначально плоской подложке из алюминия с целью улучшения теплообмена. В работах [12-14] на подложках из стекла и кремния были успешно воспроизведены дорожки медных и никелевых покрытий разной ширины (от 150 до 1500 мкм). При этом применялся сравнительно мелкий порошок (средний размер частиц составлял около 1 мкм).

© Клинков С.В., Косарев В.Ф., Усынин С.Ю., Шикалов В.С., 2023

<sup>&</sup>lt;sup>\*</sup> Работа выполнена в рамках государственного задания ИТПМ СО РАН. Эксперименты по напылению и профилометрия покрытий выполнены с использованием оборудования ЦКП "Механика" (ИТПМ СО РАН).

близкое к треугольному. Последняя из указанных работ носила обзорный характер, в ней рассматривались также и другие области применения ХГН.

В работе [15] исследовалось образование конусообразного алюминиевого покрытия за маской с отверстием диаметром 3 мм. Было показано, что скорость частиц, а также основной диаметр конуса покрытия начинают уменьшаться на дистанции 40 мм и далее после маски. Также было обнаружено формирование пятна вокруг конусообразного покрытия, состоящего из большого числа отдельно закрепившихся частиц, диаметр которого оказался значительно больше основания конуса покрытия и увеличивался с ростом дистанции между маской и подложкой.

В работах [16, 17] были представлены результаты экспериментов и моделирования образования покрытия за маской в виде нити с поперечным диаметром 0,3 – 1 мм, располагаемой параллельно поверхности плоской преграды на различных расстояниях. Здесь экспериментально определялись картины движения частиц алюминия и меди в окрестности маски и было обнаружено наличие распределения скоростей частиц по углу в струе с характерным стандартным отклонением 1,5–2 град. Кроме того, было показано, что это распределение, а также эффект активации (задержки) напыления влияют на процесс образования покрытия за маской.

Однако в представленных по этой тематике работах были изучены не все аспекты поведения сверхзвуковой двухфазной струи, проходящей через перфорационные каналы в маске. Поэтому очевидно, что исследование использования масок в условиях ХГН остается актуальным. Описываемые здесь результаты ранее были частично опубликованы в трудах конференций [18, 19].

#### Описание экспериментальной установки

Шлирен-визуализация газодинамической картины течения в зазоре между подложкой и маской проводилась с использованием прибора ИАБ-451. Для этого был изготовлен стенд (рис. 1) для установки и крепления сопла и устройство позиционирования маски относительно сопла и регулирования расстояния между маской и подложкой.

Сверхзвуковая расчетная струя формировалась с помощью осесимметричного сопла Лаваля, имеющего длину сверхзвуковой части 145 мм с диаметрами критического и выходного сечений  $d_{\rm cr} = 2,8$  мм и  $d_{\rm ex} = 6,5$  мм соответственно. В качестве масок использовались стальные пластины толщиной  $\delta_{\rm m} = 1,0$  и 2,7 мм. Маска толщиной 1 мм содержала цилиндрические апертуры диметрами  $d_{\rm ap} = 0,75, 1,25, 2,06$  и 4,15 мм; маска толщиной 2,7 мм содержала цилиндрические апертуры диаметрами 0,74, 1,32, 2,08



Рис. 1. Экспериментальная установка. 1 — форкамера, 2 — сопло Лаваля, 3 — маска, 4 — рельсовая каретка, 5 — ходовой винт.

| Puc. 2. Схематическое изображение натекания струи              |
|--|
| на маску с апертурой, расположенной перед подложкой.           |
| 1 — сопло, 2 — струя, натекающая на маску, 3 — маска           |
| с отверстием, 4 — струя, натекающая на подложку, 5 — подложка. |

и 4,32 мм. Дистанция установки маски от поверхности подложки варьировалась в пределах  $z_{\rm ms} = 1 - 16$  мм, дистанция от среза сопла до подложки была постоянной и составляла  $z_{\rm ns} = 30$  мм. Поток из сопла направлялся перпендикулярно поверхности подложки. При визуализации сопло не перемещалось и располагалось соосно с отверстием в маске (см. рис. 2), воздух не подогревался, давление в форкамере сопла было равно 3,75 МПа.

Эксперименты по напылению проводились на ус-



тановке ХГН (ИТПМ СО РАН). В качестве рабочего и транспортирующего газов использовался воздух. Давление рабочего газа в форкамере поддерживалось постоянным и составляло 3 МПа, температура в форкамере была равна 573 К. Давление транспортирующего газа в дозаторе поддерживалось постоянным и равным 3,1 МПа, газ не подогревался. В экспериментах по напылению через маску сопло двигалось над апертурой с постоянной скоростью 100 мм/с вдоль поверхности маски.

С использованием программного пакета Vision64 на профилограммах, полученных с помощью бесконтактного интерференционного профилометра ContourGT-K1 (Bruker, Германия), были измерены диаметры пятен напыления, сформированных через отверстия различных диаметров на разных дистанциях маска–подложка. Также использовались оптические микроскопы Axio Scope.A1 и StereoDiscovery V12 (Carl Zeiss, Германия). Распределение по размерам напыляемого алюминиевого порошка (АСД-1) измерялось с помощью анализатора размера частиц LS 13 320 (Beckman Coulter, США). Частицы имели сферическую форму со средним объемным диаметром 32 мкм и стандартным отклонением 16 мкм.

## Метод расчета

Расчет натекания сверхзвуковой струи на подложку с установленной перед ней маской с круглой апертурой проводился с помощью программного комплекса ANSYS. Постановка и решение задачи заключались в создании двумерной модели исследуемой геометрии и моделировании потока воздуха, натекающего на подложку через апертуру в маске.

## Создание геометрической модели расчетной области

На первом этапе создавалась конфигурация модели для осесимметричного расчета. Модель исследуемой конфигурации включала в себя сопло, маску и подложку. Расстояние между маской и подложкой выбиралось в соответствии с проведенными экспериментами.

## Создание сеточной модели расчетной области на базе геометрической

Далее создавалась сеточная модель расчетной области. Сетка состояла из 160 000 прямоугольных элементов с минимальным ортогональным качеством 0,97 и максимальным соотношением сторон 11:1. Сгущение сетки обеспечивало хорошую точность в областях сложного течения. Решение продолжалось до тех пор, пока не достигался дисбаланс массы и энергии ниже 0,01 %. Для более точного разрешения градиентов переменных в пространстве расчетной области выполнялась двумерная адаптация расчетной сетки. Она проводилась по стенкам сопла, маски и подложки. Данная сетка была выбрана в качестве оптимальной в процессе исследования сходимости по сетке.

#### Создание расчетной модели

Расчетная модель создавалась путем дополнения сеточной модели расчетными условиями (см. рис. 3). Расчет проводился со следующими установленными параметрами:

— использовалась модель турбулентности *k*-ω SST;

— передача тепловой энергии в потоке описывалась с помощью уравнения энергии;

— применялась неявная схема интегрирования 2-го порядка точности;

— для более быстрого расчета число Куранта менялось через определенный промежуток итераций с помощью встроенной опции Solution Steering.

Граничные условия задавались для элементов модели следующим образом:

— материалом таких поверхностей, как стенки сопла, стенки маски и подложки, была выбрана сталь с температурой поверхности 300 К;

— для моделирования условий шлирен-визуализации газодинамической картины течения и напыления на входной границе температура воздуха равнялась 300 и 573 К, давление торможения — 3,75 и 3 МПа соответственно;

 истечение струи происходило в окружающее пространство с давлением воздуха 0,1 МПа и температурой 300 К.

Движение частиц моделировалось в приближении одиночных частиц, когда их влиянием на газ можно пренебречь. Это оправданное приближение, поскольку в условиях реального напыления объемные концентрации частиц малы (менее 10<sup>-3</sup>) [20]. В рассчитанный газовый поток вводились по одной алюминиевые частицы разного диаметра от 5 до 50 мкм, что примерно соответствует дисперсному составу алюминиевого порошка АСД-1. Частицы вводились в форкамере сопла (на расстоянии 45 мм от критического сечения с начальной температурой 300 К и скоростью 10 м/с) как по его оси, так и на некотором расстоянии от нее. Также для сравнения авторами проводились расчеты с вводом частиц на срезе сопла на разных расстояниях от его оси. В этом случае начальные параметры частиц были равны полученным при расчете с введением частиц в форкамере сопла по оси. При расчете параметров частиц учитывалась только сила сопротивления



Рис. 3. Расположение граничных условий и характерные размеры расчетной области. *I* — входная граница, 2 — ось симметрии, 3 — стенка сопла, 4 — выходная граница, 5 — поверхность маски, 6 — поверхность подложки.

по аппроксимации, заложенной в пакете ANSYS Fluent как закон сопротивления для сферических частиц с поправкой на числа Маха частицы выше 0,4 [21]. Это также оправданное приближение, так как выполненные ранее оценки показали, что остальными силами (например, гравитационной, термофореза, Магнуса, Бассе, присоединенной массы и др.) можно пренебречь [20].

#### Результаты

#### Теневая визуализация (эксперимент и расчет)

Получены картины течения через маску с цилиндрическими апертурами для двух случаев: толщины маски 1,0 мм с диаметрами апертур  $d_{\rm ap} = 1,25, 2,06$  и 4,15 мм и толщины маски 2,7 мм с диаметрами апертур  $d_{ap} = 1,32, 2,08$  и 4,32 мм с вариацией расстояния между маской и подложкой  $z_{ms} = 4$  и 8 мм. На рис. 4 и 5 приведены для сравнения смоделированные и экспериментальные картины течения газа (градиенты плотности). Видно, что при диаметре отверстия в маске менее 4 мм перед поверхностью маски возникает прямая ударная волна; при диаметре около 4 мм возникает более сложная комбинация, состоящая из косых и прямой ударных волн, при этом прямой скачок оказывается внутри маски. Часть газа течет по поверхности маски, а другая часть проходит через апертуру и создает сверхзвуковую недорасширенную струю, направленную к поверхности подложки. Эта струя снова замедляется за новой ударной волной, которая появляется перед поверхностью подложки. Следовательно, в такой сложной геометрии в потоке газа возникают две головные ударные волны, за которыми газ замедляется до дозвуковой скорости, и область между ними, где газ ускоряется до сверхзвуковой скорости. В целом такая картина наблюдается для всех условий, изученных в настоящем исследовании. Важно отметить, что смоделированная картина течения воспроизводит экспериментально полученные теневые изображения методом шлирен-визуализации.

#### Расчет скорости частиц

Далее с использованием рассчитанных осредненных параметров газового течения с температурой торможения 573 К (характерной для экспериментального напыления алюминиевых частиц) авторами вычислялись параметры частиц. На рис. 6 показаны результаты расчета скорости удара алюминиевых частиц разного диаметра при их движении вдоль оси в потоке воздуха для конфигураций, представленных на рис. 4 и 5, а также для конфигурации без маски. Можно видеть, что максимальная скорость удара характерна для частиц диаметром 10-20 мкм в зависимости от геометрической конфигурации. Наличие такого диаметра частиц, при котором достигается максимальная скорость удара, связано с торможением газа и, соответственно, наличием частиц перед подложкой. Мелкие частицы имеют более высокую скорость при подлете к подложке по сравнению с крупными, но они и сильнее тормозятся. Крупные частицы практически не отслеживают особенностей газового течения вблизи подложки, что, в частности, приводит к сходимости всех кривых на рис. 6. Например, уже для частиц диаметром 50 мкм разность в скоростях удара, связанная с особенностями газового течения в окрестности разных конфигураций, не превышает 3 % (рис. 6). Обращает на себя внимание тот факт, что некоторые геометрические конфигурации (соответствующие кривым 1-3 на рис. 7) приводят к увеличению скорости удара частиц по сравнению со случаем без маски (кривая 5 на рис. 6), что явилось неожиданным. Для выяснения причин этого обстоятельства были построены зависимости скорости газа и частиц малого диаметра от продольной координаты



*Рис. 4.* Сравнение результатов расчетов (слева) и экспериментов (справа) с маской толщиной 1 мм. *a*, *b* — *d*<sub>ap</sub> = 1,25 мм, *z*<sub>ms</sub> = 4 мм; *c*, *d* — *d*<sub>ap</sub> = 2,06 мм, *z*<sub>ms</sub> = 4 мм; *e*, *f* — *d*<sub>ap</sub> = 2,06 мм, *z*<sub>ms</sub> = 8 мм; *g*, *h* — *d*<sub>ap</sub> = 4,15 мм, *z*<sub>ms</sub> = 8 мм.

для двух характерных комбинаций (1 и 3 на рис. 6) и для сравнения в условиях без маски (5 на рис. 6), представленные на рис. 7. Видно, что в обоих случаях при наличии маски частицы подлетают к ударной волне перед подложкой с меньшей скоростью, чем без маски. Это происходит из-за торможения за первой ударной волной, возникающей из-за маски,



*Рис.* 5. Сравнение результатов расчетов (слева) и экспериментов (справа) с маской толщиной 2,7 мм.  $a, b - d_{ap} = 1,32 \text{ мм}, z_{ms} = 4 \text{ мм}; c, d - d_{ap} = 2,08 \text{ мм}, z_{ms} = 4 \text{ мм};$  $e, f - d_{ap} = 2,08 \text{ мм}, z_{ms} = 8 \text{ мм}; g, h - d_{ap} = 4,32 \text{ мм}, z_{ms} = 8 \text{ мм}.$ 

и данное торможение никаким образом не компенсируется последующим движением частиц в сильно ускоряющемся потоке газа (между маской и подложкой), как это показано на рис. 7. При движении в потоке между ударной волной и поверхностью подложки



*Рис. 6.* Зависимость скорости удара алюминиевых частиц о поверхность подложки от их диаметра для разных геометрических комбинаций маски.

$$\begin{split} I & = d_{\rm ap} = 2,06 \ {\rm Mm}, \ z_{\rm ms} = 4 \ {\rm Mm} \ (z_{\rm ms}/d_{\rm ap} = 1,9), \ {\rm толщина} \ {\rm Macku} \ 1 \ {\rm Mm}; \ 2 & = d_{\rm ap} = 2,08 \ {\rm mm}, \ z_{\rm ms} = 4 \ {\rm Mm} \ (z_{\rm ms}/d_{\rm ap} = 1,9), \ {\rm толщинa} \ {\rm Macku} \ 2,7 \ {\rm mm}; \ 3 & = d_{\rm ap} = 4,15 \ {\rm mm}, \ z_{\rm ms} = 8 \ {\rm mm} \ (z_{\rm ms}/d_{\rm ap} = 1,9), \ {\rm толщинa} \ {\rm Macku} \ 1 \ {\rm mm}; \ 4 & = d_{\rm ap} = 4,32 \ {\rm mm}, \ z_{\rm ms} = 8 \ {\rm mm} \ (z_{\rm ms}/d_{\rm ap} = 1,9), \ {\rm толщинa} \ {\rm Macku} \ 1 \ {\rm mm}; \ 4 & = d_{\rm ap} = 4,32 \ {\rm mm}, \ z_{\rm ms} = 8 \ {\rm mm} \ (z_{\rm ms}/d_{\rm ap} = 1,9), \ {\rm толщинa} \ {\rm Macku} \ 1 \ {\rm mm}; \ 7 & = d_{\rm ap} = 1,32 \ {\rm mm}, \ z_{\rm ms} = 4 \ {\rm mm} \ (z_{\rm ms}/d_{\rm ap} = 3,0), \ {\rm толщинa} \ {\rm Macku} \ 2,7 \ {\rm mm}; \ 8 \ {\rm mm} \ (z_{\rm ms}/d_{\rm ap} = 3,9), \ {\rm толщинa} \ {\rm Macku} \ 2,7 \ {\rm mm}; \ 8 \ {\rm mm} \ (z_{\rm ms}/d_{\rm ap} = 3,9), \ {\rm толщинa} \ {\rm Macku} \ 1 \ {\rm mm}; \ 9 \ {\rm mm} \ d_{\rm ap} = 2,08 \ {\rm mm}, \ z_{\rm ms} = 8 \ {\rm mm} \ (z_{\rm ms}/d_{\rm ap} = 3,9), \ {\rm толщинa} \ {\rm Macku} \ 2,7 \ {\rm mm}. \end{split}$$

частицы тормозятся, причем в случаях без маски до более низких скоростей, несмотря на более высокую скорость на входе в эту зону. На рис. 7*a* видно, что без маски ударная волна отходит на большее расстояние от подложки, чем в случае с маской. Это могло бы быть причиной более сильного торможения частиц. Однако рис. 7*b* показывает, что ударная волна как в случае с маской, так и без нее отстоит примерно на одинаковом расстоянии от поверхности подложки, а частицы в случае без маски все равно сильнее тормозятся. Авторы предположили, что причиной является более низкая плотность газа в этой зоне в случаях с маской. И действительно, рис. 8 демонстрирует, что характерная величина плотности газа перед подложкой в условиях с маской в три раза ниже, чем без маски.



Рис. 7. Зависимость скорости газа (1, 2) и частиц диаметром 5 мкм (3, 4) и 10 мкм (5, 6) от продольной координаты в окрестности маски и подложки.

*а*, *b* — соответственно случаи *l* и *3* на рис. 6;

1, 3, 5 — скорости при наличии маски, 2, 4, 6 — скорости в отсутствие маски;

поверхность подложки расположена в положении z = 30 мм,

заштрихованная область — положение маски.

Рис. 8. Изменение плотности газа вдоль оси струи в окрестности маски и подложки. *l* и 2 — соответственно случаи *l* и 3 на рис. 6, 3 — случай без маски; заштрихованные области — положение маски.

Следует отметить, что качественно картина движения газа и частиц повторяется во всех случаях, но в большинстве их скорость удара частиц при наличии маски все же ниже, чем в случае без маски (рис. 6). Случаи, представленные на рис. 6, можно приближенно обобщить по отношению  $z_{\rm ms}/d_{\rm ap}$ . Конфигурации, дающие сравни-



тельно высокие скорости удара частиц, соответствуют значению этого отношения ~2, далее идут последовательно ~ 3 и ~4. Для среднего размера частиц порошка, использованного для напыления (около 30 мкм), скорость удара для разных конфигураций (в том числе и без маски) меняется незначительно, в пределах 590-625 м/с, т.е. менее 6 % (рис. 6). Это позволяет заключить, что наличие маски не может существенно повлиять на вероятность закрепления этих частиц на поверхности подложки, по крайней мере, в области вблизи оси струи.

Далее для исследования уширения диаметра покрытия по сравнению с диаметром апертуры была проведена серия расчетов с запуском частиц на некотором расстоянии от оси. В первой серии расчетов частицы запускались из форкамеры сопла, как и ранее, но со смещением по радиусу. В результате рассчитывались скорость удара частиц и радиус, на котором они сталкивались с поверхностью подложки. Для примера синим цветом на рис. 9a - 9d представлены результаты этих расчетов для конфигураций, соответствующих случаям 1, 3, 5 и 8 на рис. 6, для частиц диаметром 5 и 10 мкм. Видно, что в расчетах наблюдается расширение пучка частиц по сравнению с диаметром апертуры. Кроме того, зависимость скорости удара от его радиуса может меняться. Например, на рис. 9a скорость удара монотонно падает с увеличением радиуса удара, на рис. 9d, наоборот, растет, а на рис. 9b и 9c имеет немонотонный характер поведения.

Отметим, что в ходе расчетов было обнаружено, что, изменяя значение начального радиуса, с которого запускались частицы в форкамере, невозможно было получить результаты для частиц, движущихся на периферии струи. Наглядно это демонстрирует рис. 9c, где представлены результаты расчета для геометрической конфигурации без маски. Видно, что крайнему радиусу разлета частиц соответствуют значения 0,9 мм для частиц диаметром 10 мкм и 1,8 мм — для 5 мкм. Напомним, что сопло имело выходной радиус 3,25 мм и, таким образом, полученные предельные радиусы оказались заметно меньше него. Однако, согласно результатам экспериментов, пятно напыления всегда несколько больше выходного радиуса сопла, но никак не меньше. Возможными причинами этого несоответствия являются столкновения частиц со стенками сопла, а также турбулентность потока. Эти факторы могут на практике приводить к дополнительному расширению пучка частиц на выходе из сопла, но они не учитывались при расчетах (как уже упоминалось ранее, рассматривалось движение одиночных частиц в осредненном газовом потоке).

В связи с последним обстоятельством была проведена дополнительная серия расчетов, в которых частицы запускались на разных радиусах на срезе сопла. Вставал вопрос о том, какие брать начальные параметры частиц. Авторы предположили, что в первом приближении можно принять в качестве начальных параметров те величины, которые были получены в представленных ранее расчетах для частиц, движущихся по оси сопла. Результаты расчетов с такими начальными параметрами частиц представлены на рис. 9 красным цветом. Видно, что на малых радиусах имеет место совпадение с кривыми, выделенными синим, это подтверждает правомочность предложенной замены начальных условий для частиц. Также можно видеть, что для некоторых конфигураций (например, рис. 9а и 9d) новые предельные радиусы почти не отличаются от полученных ранее. Это связано с ограничивающим действием апертуры маски, радиус которой (~1 мм) заметно меньше радиуса струи. Однако для других конфигураций отличия могут быть значительными и зависеть также от размера частиц, как, например, на рис. 9b, где радиус маски (~2 мм) заметно больше, чем предельный радиус разлета частиц при запуске их из форкамеры, который практически не отличается от случая натекания на подложку без маски (рис. 9с).



 Рис. 9. Распределение скорости удара о подложку частиц, запущенных из форкамеры (1, 2) и со среза сопла (3, 4), вдоль радиуса.
а — случай 1 на рис. 6 (d<sub>ap</sub> = 2,06 мм, z<sub>ms</sub> = 4 мм); b — случай 3 на рис. 6 (d<sub>ap</sub> = 4,15 мм, z<sub>ms</sub> = 8 мм); с — случай 5 на рис. 6 (без маски); d — случай 8 на рис. 6 (d<sub>ap</sub> = 2,06 мм, z<sub>ms</sub> = 8 мм); частицы диаметром 10 мкм (1, 3) и 5 мкм (2, 4).



Рис. 10. Фотографии зоны покрытия на подложке. Дистанция маска – подложка: 1 (*a*, *b*) и 16 (*c*, *d*) мм; диаметр отверстия в маске — 0,74 (*a*, *c*) и 4,32 (*b*, *d*) мм; толщина маски 2,7 мм.

#### Напыление через маску с цилиндрической апертурой

На рисунке 10 в качестве примера приведены фотографии покрытий, напыленных через маску при минимальной и максимальной дистанциях маска–подложка: 1 (a, b) и 16 (c, d) мм. Видно, что более четкая граница покрытия получается при минимальных расстояниях, которые определяются в первую очередь толщиной покрытия, т.е. расстояние от маски до подложки должно быть больше толщины покрытия.

С помощью программного пакета Vision64 на профилограммах, полученных с помощью интерференционного профилометра, были измерены диаметры пятен напыления, сформированных через отверстия различных диаметров на разных дистанциях маска – подложка. Ниже (см. рис. 11) в качестве примера показан результат профилометрии пятна напыления, полученного через апертуру диаметра  $d_{\rm ap} = 4,32$  мм в маске толщиной 2,7 мм, расположенной на расстоянии 16 мм от подложки.

Рис. 12 отображает картину изменения диаметра зоны покрытия  $d_c$  на подложке в зависимости от дистанции маска-подложка  $z_{ms}$  при напылении через отверстия диаметром  $d_{ap}$ . Видно, что диаметр покрытия в среднем растет с увеличением дистанции маска – подложка. Здесь же показаны расчетные величины для различных конфигураций. Приведены данные для трех диаметров частиц: 5, 10 и 30 мкм. Можно видеть, что на малых дистанциях результаты расчетов примерно соответствуют экспериментальным данным (тем более с учетом того, что экспериментальным данным также присущ некоторый разброс). Однако при больших дистанциях результаты расчета показывают явно заниженное значение уширения пятна напыления. Это может быть связано с тем, что в расчете



Рис. 11. Профиль пятна напыления (3D), полученного через апертуру диаметра  $d_{\rm ap} = 4,32$  мм в маске толщиной 2,7 мм, расположенной на расстоянии  $z_{\rm rns} = 16$  мм.



*Рис. 12.* Зависимость диаметра пятна напыления  $d_{\rm c}$  от расстояния маска – подложка  $z_{\rm ms}$  при напылении через отверстия с разными диаметрами (величины нормированы на диаметр отверстия  $d_{\rm ap}$ ).

1-4 — экспериментальные результаты для маски толщиной 1 мм: диаметры апертур 0,75 (1), 1,25 (2), 2,06 (3), 4,15 (4) мм, 5 — линейная аппроксимация экспериментальных данных,
6-17 — результаты расчетов: диаметры апертур 0,75 (6-8), 1,25 (9-11), 2,06 (12-14), 4,15 (15-17) мм; диаметры частиц 5 (6, 9, 12, 15), 10 (7, 10, 13, 16) и 30 (8, 11, 14, 17) мкм.

не учитываются столкновения частиц с краями апертуры, которые на практике вместе с турбулентностью и столкновениями частиц друг с другом могут приводить к дополнительному уширению пятна напыления.

#### Заключение

В настоящей работе впервые приведены результаты расчетных и экспериментальных исследований взаимодействия сверхзвуковой струи с частицами в условиях ХГН со сложной преградой, состоящей из маски с круглым цилиндрическим отверстием, расположенной на разных расстояниях от подложки. Получены численные картины течения через маску с цилиндрическими апертурами, и показано их качественное соответствие с картинами теневой визуализации шлирен-методом. Также авторами с использованием рассчитанных параметров газового течения, характерного для экспериментального напыления алюминиевых частиц, рассчитывались параметры частиц. Показано, что максимальная скорость удара характерна для частиц диаметром 10 – 20 мкм в зависимости от геометрической конфигурации. Крупные частицы практически не отслеживают особенностей газового течения вблизи преграды. Например, уже для частиц диаметром 50 мкм разность в скоростях удара, связанная с особенностями газового течения в окрестности разных конфигураций, не превышает 3 %. Обнаружено, что некоторые конфигурации приводят к увеличению скорости удара частиц по сравнению со случаем без маски, что объясняется тем, что характерная величина плотности газа перед подложкой в этих случаях значительно ниже, чем в случае без маски. Однако в большинстве случаев скорость удара частиц при наличии маски все же ниже, чем в случае без маски. Показано, что допустимо приближенное обобщение в отношении дистанции между маской и подложкой к диаметру апертуры. Конфигурации, демонстрирующие сравнительно высокие скорости удара частиц, соответствуют значению этого отношения  $\sim 2$ , далее идут последовательно ~ 3 и ~ 4.

Диаметр покрытия в среднем растет с увеличением дистанции маска – подложка. При малых дистанциях между маской и подложкой результаты расчетов примерно соответствуют данным эксперимента. Однако при больших дистанциях результаты расчета показывают явно заниженное значение уширения пятна напыления. Это может быть связано с тем, что в расчете не учитываются столкновения частиц с краями апертуры, которые на практике вместе с турбулентностью и столкновениями частиц друг с другом могут приводить к дополнительному уширению пятна напыления. В целом можно заключить, что моделирование движения газа и частиц является важным инструментом для изучения и оптимизации процесса холодного газодинамического напыления в условиях рассмотренных достаточно сложных конфигураций маска – подложка.

Авторы благодарны Трубачееву Г.В. за помощь при проведении теневой визуализации струи.

#### Список литературы

- **1.** Алхимов А.П., Клинков С.В., Косарев В.Ф., Фомин В.М. Холодное газодинамическое напыление. Теория и практика. М.: Физматлит, 2010. 536 с.
- 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 and Coatings Technology. 2010. Vol. 205, No. 4. P. 1115–1118.
- Rastjagaev E., Wilde J., Wielage B., Grund T., Küemmel S. Development and testing of cold gas sprayed circuit boards for power electronics applications // Proc. of 7<sup>th</sup> 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. of Thermal Spray Technology. 2012. Vol. 22, No. 2–3. P. 422–432.
- 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. Proceedings. 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 слоёв меди на керамические материалы из оксида и нитрида алюминия // Современная электроника. 2018. № 1. С. 30–35.
- 7. Пат. 2687598 РФ, МПК<sup>51</sup> С04 В41/88. 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 // Int. J. of 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 // Int. J. of Heat and Mass Transfer. 2014. Vol. 75. P. 235–244.
- 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. of 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 // Int. J. of 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. of Thermal Spray Technology. 2013. Iss. 22, No. 7. P. 1092–1102.
- 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.
- 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. of Thermal Spray Technology. 2013. Vol. 22, No. 5. 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. 2, № 2. С. 221–232.
- Shikalov V.S., Klinkov S.V., Kosarev V.F., Melamed B.M. Profile of cold sprayed coating formed through a round aperture // AIP Conf. Proc. 2019. Vol. 2125. P. 030024-1–030024-4.
- Kosarev V.F., Klinkov S.V., Melamed B.M., Trubacheev G.V., Usynin S.Yu., Shikalov V.S. Investigation of gas flow through a mask at cold sprayin // AIP Conf. Proc. 2020. Vol. 2288. P. 030013-1–030013-4.
- **20.** Яненко Н.Н., Солоухин Р.И., Папырин А.Н., Фомин В.М. Сверхзвуковые двухфазные течения в условиях скоростной неравновесности частиц // Отв. ред. Накоряков В.Е. Новосибирск: Наука. 1980. 159 с.
- 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. of Thermal Spray Technology. 2018. Vol. 27. P. 1491–1517.

Статья поступила в редакцию 20 октября 2022 г., после доработки — 27 января 2023 г., принята к публикации 2 марта 2023 г.