Оптимизация процесса холодного напыления металлов для аддитивных технологий

И. С. Яковенко, А. Л. Котельников и А. Д. Киверин
Объединенный институт высоких температур РАН, Ижорская ул., 13, стр.2, Москва 125412, Россия

E-mail: yakovenko.ivan@bk.ru

Статья поступила в редакцию 22 декабря 2022 г.

Аннотация. Методами численного моделирования проведено исследование многофазных течений, формируемых в ходе процесса высокоскоростного холодного напыления. На примере сопла Лаваля исследовано влияние давления на входе в сопло, геометрического профиля подложки, начальной скорости микрочастиц и положения точки подвода частиц в газовый поток на эффективность процесса холодного напыления. Показано существенное повышение эффективности напыления при подаче микрочастиц за критическим сечением сопла, в области боковой поверхности струи. https://doi.org/10.33849/2022205

1. ВВЕДЕНИЕ

Технология холодного газодинамического напыления твердых микрочастиц на поверхность подложки, предложенная в начале 1980-х годов в Институте теоретической и прикладной механики СО РАН [1], широко используется для создания новых материалов и нанесения функциональных покрытий с заданными свойствами на элементы конструкций. В основе этой технологии лежит процесс ускорения микрочастиц в сверхзвуковой струе газа, формируемой при прохождении газового потока через сопло Лаваля. Перенос частиц сверхзвуковым потоком обеспечивает ускорение частиц до высоких скоростей, но при этом температура частиц остается ниже температуры плавления, а адгезия покрытия обеспечивается за счет сильной пластической деформации микрочастиц при столкновении с подложкой [2].

Помимо нанесения покрытий, сегодня технология холодного напыления активно применяется для задач аддитивного производства [3]. Ввиду того, что процесс высокоскоростного газодинамического переноса микрочастиц не предусматривает их плавления, холодное напыление хорошо подходит для послойной печати трехмерных объектов из металлов и сплавов, в частности печати, модификации и ремонта отдельных деталей авиационной и аэрокосмической техники.

Использование технологии холодного напыления для задач аддитивного производства представляет собой относительно новое направление в промышленности. Несмотря на наличие на рынке экземпляров оборудования для трехмерной печати с использованием технологии холодного напыления, их дальнейшее усовершенствование требует фундаментального анализа газодинамических процессов, развивающихся внутри сопла, внутренней и внешней баллистики при ускорении частиц и их переносе на поверхность подложки. В частности, большую важность имеют данные, на основе которых возможна оптимизация технологии, обеспечивающая миниатюризацию установки без снижения эффективности напыления. Актуальность такого направления оптимизации продиктована тем, что наиболее перспективные подходы к решению задач, связанных с трехмерной печатью и восстановлением поврежденных объектов, основаны на применении мобильных роботизированных платформ с большим числом степеней свободы [4].

Продуктивным методом анализа физических процессов, сопутствующих холодному напылению, и оптимизации этой технологии является использование подходов вычислительной газодинамики многофазных сред. Всестороннее экспериментальное исследование во многом ограничено ввиду большого количества определяющих параметров, высокой стоимости изготовления отдельных узлов и систем диагностики. Вычислительные методы, в свою очередь, хорошо зарекомендовали себя для решения задач оптимизации технологий напыления покрытий [5]. Однако технологии аддитивного производства требуют учета дополнительных факторов, в частности, пространственных размеров сопла, динамического изменения геометрии подложки при послойном напылении, точности локализации напыляемого материала. Существенным ограничением традиционных методик холодного напыления является относительно крупный размер пятна напыляемого материала (≈ 4 мм [6]), что делает невозможным печать мелкомасштабных объектов и структур. В целях разработки способов контроля размеров и формы пятна исследуются подходы с применением сопла нестандартной геометрии [7, 8].

В настоящей работе с применением детальных вычислительных экспериментов проведено исследование многофазных течений, формируемых при напылении микрочастиц на подложку, с целью выявления особенностей процесса для его эффективного применения в рамках задач аддитивных технологий. В частности, выполнен анализ влияния давления газа на входе в сопло, профиля подложки, начальной скорости микрочастиц и пространственного положения точки подвода частиц в газовый поток. При этом анализируется возможность использования особенностей структуры газодинамического потока, ускоренного в сопле Лаваля, с более широким критическим сечением, по сравнению с традиционными методиками холодного газодинамического напыления. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации процесса холодного напыления для задач создания, модификации и ремонта трехмерных объектов из металлов.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В рамках рассматриваемой постановки задачи проведен полный анализ процесса высокоскоростного газо-

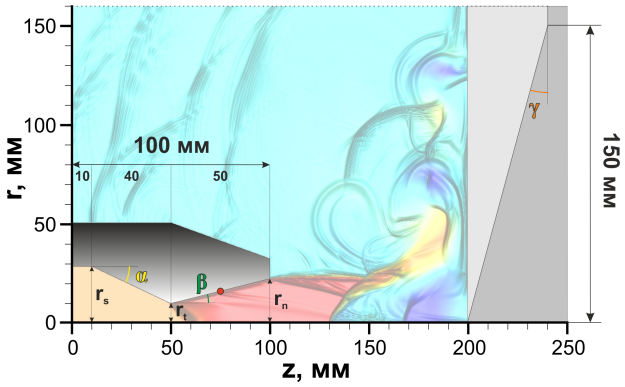

Рисунок 1. Постановка задачи вычислительных экспериментов для анализа различных аспектов процесса холодного напыления микрочастиц на твердотельную подложку.

динамического течения, формируемого в сопле Лаваля, с учетом наличия подложки и межфазного взаимодействия микрочастиц с потоком. Геометрические параметры сопла, подложки и зазора между ними схематично приведены на рисунке 1. На входе сопла задано условие на давление $P_{in} = 5$, 10, 15, 20 атм и температуру $T_{in} = 550$ К поступающего в сопло газа. В качестве рабочего газа выбран воздух, как наболее удобный с точки зрения автономности и экономичности. Параметры несущего потока на входе в сопло далее определяются, исходя из решения задачи Римана о распаде произвольного разрыва для заданных значений P_{in} и T_{in}. Достижение конечных значений давления достигается за время релаксации ($\tau = 5$ мкс), в течение которого давление нарастает по линейному закону во избежание формирования мощной ударной волны в начальный момент времени. В рамках рассматриваемой постановки параметры течения соответствуют представленным в работе [9], где обсуждаются результаты экспериментального исследования особенностей работы перспективной установки холодного газодинамического напыления низким давлением применительно к задачам аддитивных технологий. Параметры сопла были выбраны близкими к рассмотренным в работе [10], где на основе экспериментального и расчетно-теоретического анализа получены оптимальные конфигурации геометрии сопла для давлений на входе в сопло 25–30 МПа. Так, в настоящей работе рассмотрено сопло с длиной прямолинейного участка 10 мм, длиной сужающейся секции 40 мм и длиной расширяющейся секции 50 мм. Коэффициент расширения сопла, определяемый как отношение площади среза сопла к площади критического сечения, выбирался равным 5, что соответствует диапазону оптимальных значений коэффициента расширения, полученных в [10, 11]. При этом было рассмотрено две основные конфигурации сопла — с радиусом критического сечения 4 мм ($r_s = 22.9$ мм, $r_t = 4$ мм, $r_n = 8.9$ мм, $\alpha = 25°$, $\beta = 5.6°$) и 10 мм ($r_s = 28.9$ мм, $r_t = 10$ мм, $r_n = 22.3$ мм, $\alpha = 25°$, $\beta = 13.9°$). Таким образом, проведен анализ газодинамических течений как в соплах с малым критическим сечением, традиционно используемых в установках холодного напыления, так и в более широких. Использование сопла с широким критическим сечением, с одной стороны, характеризуется большим расходом рабочего газа, но в то же время может быть одним из возможных способов уменьшить скорость износа сопла и избежать его засорения [12], что имеет принципиальную важность для автономной работы систем холодного напыления.

Плотность материала частиц выбрана равной 7700 кг/м^3, близкой к средней плотности стали различных марок. Диаметр частиц задавался равным 25 мкм, что соответствует среднему размеру частиц, используемых на практике [3]. Частицы подавались в газодинамический поток одна за другой, с временным промежутком между подачами в 10 мкс. Было рассмотрено два варианта положения точки подвода микрочастиц: осевое, вблизи начала координат $\vec{r}_p = (0$ мм, 0 мм$)$ и положение за критическим срезом сопла в области боковой поверхности сверхзвуковой струи $\vec{r}_{p,0} = (6$ мм, 75 мм$)$ для сопла с критическим сечением 4 мм и $\vec{r}_{p,0} = (16$ мм, 75 мм$)$ для сопла с критическим сечением 10 мм, именуемое в дальнейшем “боковым”. Схематично точка подачи за критическим сечением обозначена красным на рисунке 1. Расстояние от подложки до среза сопла составляло 10–15 см, в зависимости от ориентации подложки. Были рассмотрены профилированная подложка с наклоном $\gamma = 15°$ к вертикали и вертикальная подложка без наклона.

Осесимметричная математическая модель основана на полной системе уравнений Навье–Стокса для сжимаемого вязкого газа с учетом теплопроводности. Вычислительные алгоритмы газовой динамики аналогичны использованным авторами для анализа процессов напыления микрочастиц в потоке за детонационной волной [13] или перед ускоряющимся в канале пламенем [14, 15]. Перенос частиц описывался с помощью лагранжевой модели, что позволило отследить динамику индивидуальных частиц и провести ее статистический анализ. Модель межфазного взаимодействия учитывала взаимный обмен энергией и импульсом между частицами и газом. Коэффициент сопротивления сферической микрочастицы описывался в приближении Шиллера–Наумана [16].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Особенности газодинамического течения

Рассмотрим структуру газодинамических потоков, формируемых в сопле Лаваля и в зазоре между срезом сопла и твердотельной подложкой. На рисунке 2 приведены картины потока для случая сопла с радиусом критического сечения 4 мм. Особенности струйного течения, формируемого в зазоре между подложкой и срезом сопла, определяют процесс ускорения микрочастиц, скорость, с которой они взаимодействуют с подложкой, и принципиальную возможность их осаждения на подложке. При увеличении давления на входе в сопло скорость струи увеличивается, начиная от ≈ 800 м/с для давления $p_{in} = 5$ атм и заканчивая ≈ 1500 м/с для давления $p_{in} = 20$ атм. Важной особенностью течения является положение диска Маха, где происходит резкое торможение потока. Вслед за снижением скорости течения, уменьшается также и скорость частиц в потоке. Однако, чем больше размер частиц, тем дольше время релаксации скорости частиц к скорости потока, и в случае, если расстояние от диска Маха до подложки мало, возможно успешное осаждение движущихся по инерции частиц на подложку. Для малых давлений диск Маха не

формируется и течение имеет практически однородную структуру вплоть до поверхности подложки.

В случае давлений 15 и 20 атм можно наблюдать формирование диска Маха вблизи поверхности подложки, при этом расстояние от диска Маха до поверхности подложки увеличивается по мере увеличения давления. Для широкого сопла (см. рисунок 3) с радиусом критического сечения 10 мм диск Маха формируется на большем расстоянии от поверхности подложки, при этом с ростом давления наблюдается обратная тенденция — диск Маха приближается к поверхности подложки. При этом, однако, падение скорости потока за диском Маха становится более резким.

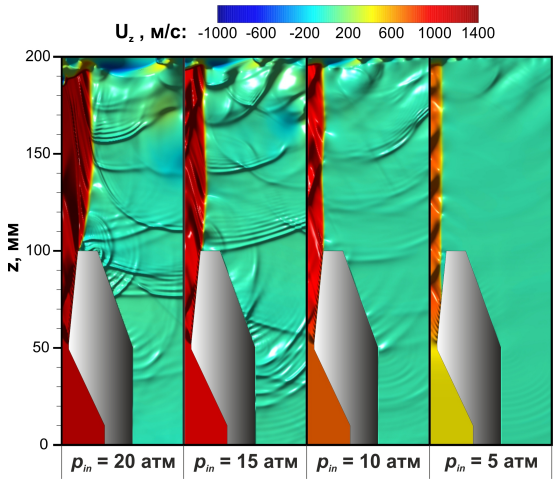

Рисунок 2. Структура газодинамического потока в случае сопла с радиусом критического сечения 4 мм. Слева направо: p_{in} = 20, 15, 10, 5 атм.

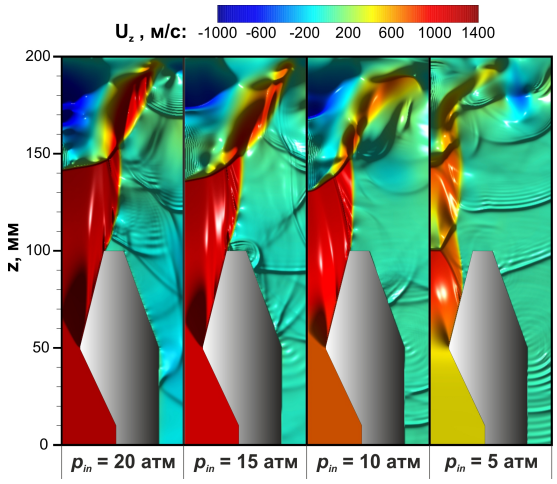

Рисунок 3. Структура газодинамического потока в случае сопла с радиусом критического сечения 10 мм. Слева направо: p_{in} = 20, 15, 10, 5 атм.

Влияние наклона подложки на картину течения продемонстрировано на рисунке 4. Можно видеть, что для сопла с широким критическим сечением изменение пространствнной ориентации подложки приводит к приближению диска Маха к поверхности подложки и уменьшению амплитуды падения скорости за диском Маха и снижению интенсивности возвратного течения

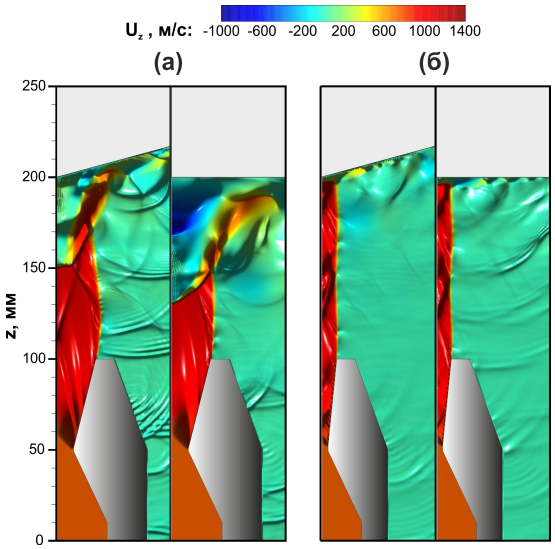

Рисунок 4. Сравнение картин течения в случае прямой и наклонной подложки p_{in} = 10 атм. а) Радиус критического сечения 10 мм; б) радиус критического сечения 4 мм.

вблизи подложки. Важно также отметить, что наклон подложки уменьшает радиус диска Маха, и скорость потока на боковой поверхности струи становится более равномерной. Это определяет возможное улучшение эффективности напыления при подаче частиц через боковую поверхность сопла за критическим сечением. Для сопла с меньшим критическим сечением изменение ориентации подложки влияет на структуру потока незначительно.

На рисунке 5 приведены профили распределения скорости потока вдоль оси сопла для случая плоской подложки (рисунок 5(*а*)) и случая наклонной подложки (рисунок 5(*б*)). Можно видеть, что изменение ориентации подложки в случае сопла с малым критическим сечением ведет к смещению диска Маха вверх по потоку, в то время как для сопла с большим критическим сечением наблюдается обратная тенденция. Для давления p_{in} = 20 атм диск Маха формируется на одинаковом расстоянии от подложки для обоих из рассмотренных вариантов сопла Лаваля. Отсюда можно заключить, что увеличение критического сечения сопла может использоваться для холодного напыления под высоким давлением (high pressure cold spray) с целью снижения износа сопла и предотвращения его засорения при условии оптимального выбора ориентации подложки.

3.2. Анализ траектории микрочастиц при их ускорении в потоке

Рассмотрим динамику движения микрочастиц в несущем потоке воздушной струи. На рисунке 6 приведены: (*а*) характерные траектории микрочастиц и (*б*) профили осевой проекции вектора скорости микрочастиц U_z^p, а также распределения этих величин на поверхности подложки. На рисунке 7 представлены гистограммы радиальной координаты частиц при их осаждении на подложку для нормальной и наклонной взаимной ориентации подложки и сопла с критическим сечением 4 мм. Можно видеть, что влияние пространственной ориентации подложки на траекторию частиц незначи-

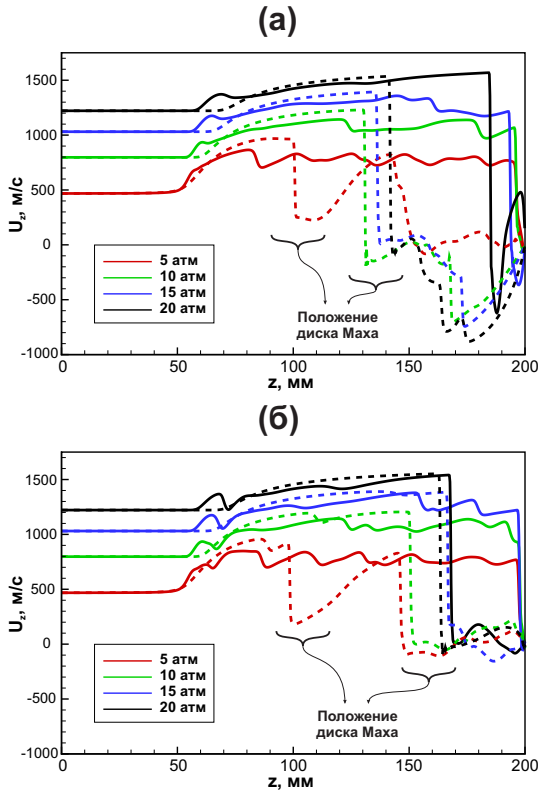

Рисунок 5. Профили скорости потока U_z в сечении вдоль оси сопла в случае нормальной (*а*) и наклонной ориентации подложки (*б*). Сплошные линии — сопло с радиусом критического сечения 4 мм, штриховые линии — сопло с радиусом критического сечения 10 мм.

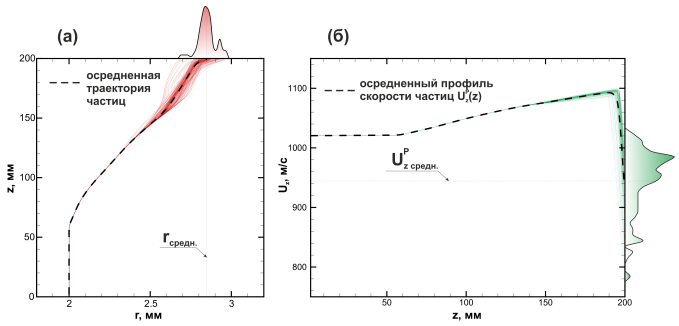

Рисунок 6. (*а*) Траектории микрочастиц внутри сопла и в зазоре между поверхностью подложки и срезом сопла. (*б*) Профили осевой проекции вектора скорости микрочастиц U_z^p. Штриховыми линиями приведены осредненные кривые для ансамбля частиц. На осях построены распределения радиальной координаты частиц на поверхности подложки и осевой проекции вектора скорости на поверхности подложки.

тельно, однако наклон подложки приводит к уменьшению разброса частиц при их осаждении на подложку и, соответственно, к снижению пространственного размера пятна напыляемого материала. Для сопла с критическим сечением 10 мм наклон подложки оказывает существенное влияние на траекторию микрочастиц и улучшает эффективность осаждения микрочастиц на подложку (см. рисунок 8). Причем локализация и процент успешно достигших подложки частиц возрастают с увеличением давления, что соответствует выводам, сделан-

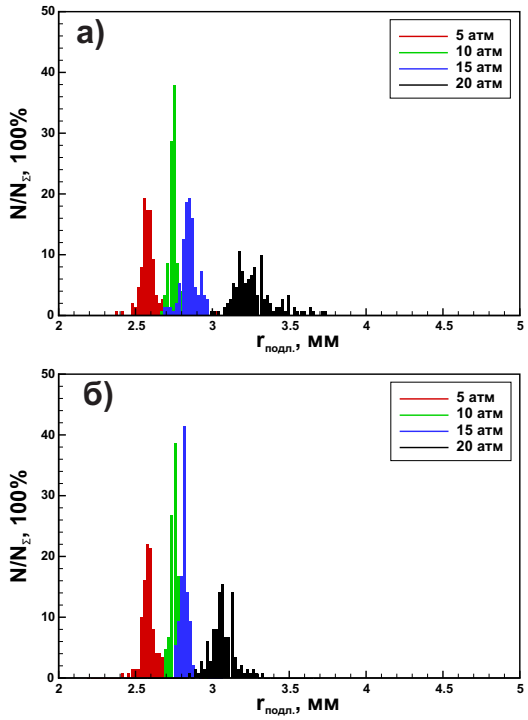

Рисунок 7. Распределение радиальной координаты микрочастиц на подложке при использовании сопла с критическим сечением 4 мм. (*а*) Нормальная ориентация подложки, (*б*) — наклоненная подложка.

ным выше на основе анализа особенностей газодинамического потока. Так, при аппроксимации распределения частиц на подложке функцией Гаусса, среднеквадратичное отклонение частиц от центра пятна уменьшается с 277 мкм для прямой подложки до 195 мкм (в 1.42 раза) в случае давления на входе сопла $p_{in} = 5$ атм, с 443 мкм до 166 мкм (в 2.67 раза) для $p_{in} = 10$ атм, с 370 мкм до 42 мкм (в 8.8 раз) для $p_{in} = 15$ атм и с 170 мкм до 24 мкм (в 7 раз) для $p_{in} = 20$ атм.

На рисунке 9 приведены гистограммы осевой составляющей скорости микрочастиц, достигших поверхности подложки для сопла с критическим сечением 4 мм в случае нормальной (рисунок 9(*а*)) и наклонной (рисунок 9(*б*)) ориентаций подложек. Наклон подложки приводит к уменьшению разброса значений скорости частиц при достижении подложки, а также к увеличению средней скорости частиц. При этом, большее снижение разброса скорости частиц наблюдается для диапазона давлений $p_{in} = 5$–15 атм. В случае давления $p_{in} = 20$ атм наблюдается увеличение средней скорости частиц на подложке с 694 м/с для плоской подложки до 946 м/с для наклонной подложки.

На рисунке 10 представлены гистограммы распределения осевой координаты осаждения частиц и гистограммы скорости частиц при подаче частиц через боковую поверхность сопла за критическим сечением для конфигураций сопла с критическим сечением 4 мм и 10 мм. Сравнивая гистограммы для вариантов с осевой и боковой подачами частиц, можно отметить, что при подаче через боковую поверхность сопла с критическим сечением 4 мм в случае осевой подачи значительно увеличивается скорость частиц при их достижении по-

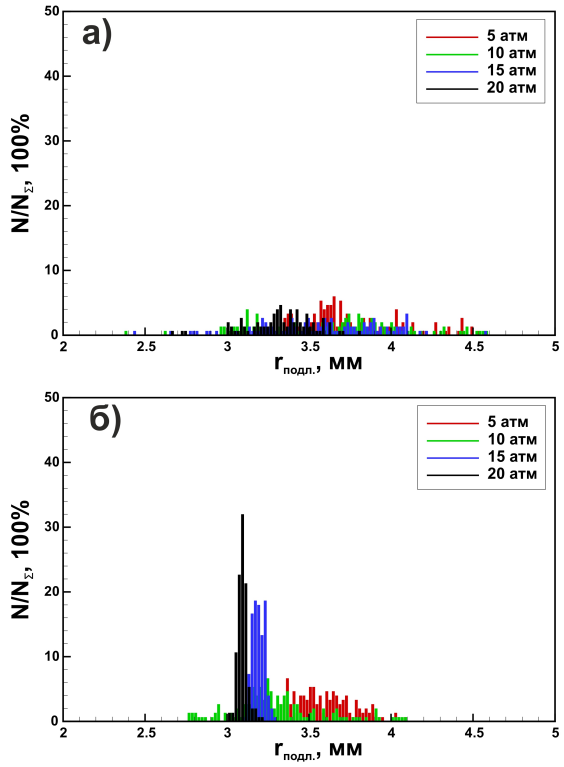

Рисунок 8. Распределение радиальной координаты микрочастиц на подложке при использовании сопла с критическим сечением 10 мм. (*а*) Нормальная ориентация подложки, (*б*) — наклоненная подложка.

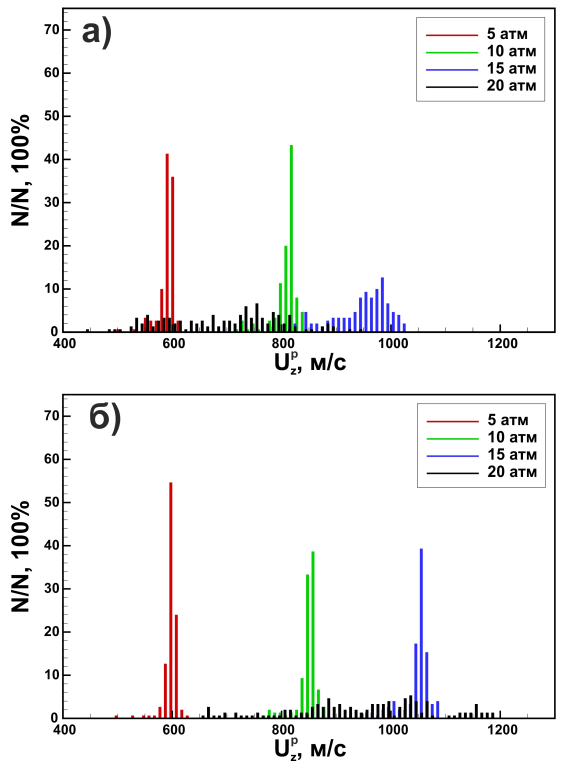

Рисунок 9. Распределение осевой скорости микрочастиц на подложке при использовании сопла с критическим сечением 4 мм. (*а*) Нормальная ориентация подложки, (*б*) — наклоненная подложка.

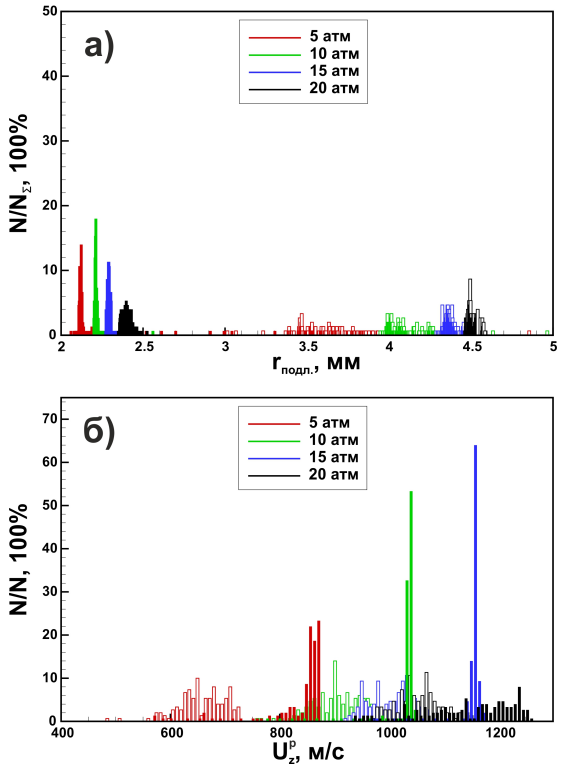

Рисунок 10. Влияние боковой подачи на параметры частиц на подложке. (*а*) Распределение радиальной координаты микрочастиц на подложке, (*б*) распределение осевой скорости микрочастиц на подложке при боковой подаче микрочастиц. Сопло с критическим сечением 4 мм (закрашенные столбцы) и критическим сечением 10 мм (белые столбцы).

верхности подложки. Для сопла с критическим сечением 10 мм существенного повышения количества и скорости осажденных частиц не наблюдается.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе выполнен численный анализ особенностей газодинамических течений с микрочастицами, формируемых в ходе работы установки холодного газодинамического напыления. В частности, проанализировано влияние давления на входе в сопло, пространственной ориентации подложки и точки подачи микрочастиц в поток струи несущего газа. Продемонстрировано, что в случае сопла с критическим сечением 4 мм увеличение давления на входе в сопло приводит к увеличению разброса координат частиц на подложке и скоростей подлета частиц. В частности, разброс скоростей и координат значительно растет при увеличении давления на входе p_{in} выше 15 атм. Изменение геометрической ориентации подложки позволяет улучшить локализацию частиц на подложке и получить более высокие скорости микрочастиц вблизи подложки. В случае сопла с более широким критическим сечением 10 мм с увеличением давления наблюдается обратная тенденция. Для случая наклонной подложки с использованием сопла с критическим сечением 10 мм локализация частиц повышается с увеличением давления. Боковая подача микрочастиц за критическим сечением сопла не оказывает существенно-

го влияния на осаждение частиц и их скорость при достижении подложки. Ввиду этого, боковая подача микрочастиц представляется перспективным способом избежать износа сопла и его засорения.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена с использованием суперкомпьютерных вычислительных ресурсов Межведомственного Вычислительного Центра РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алхимов А П, Клинков С В, Косарев В Ф и Фомин В М 2010 *Холодное газодинамическое напыление. Теория и практика* 1-е изд. (Москва: ФИЗМАТЛИТ)
2. Klinkov S V, Kosarev V F and Rein M 2005 *Aerospace Science and Technology* **9** 582–591
3. Raoelison R N, Verdy C and Liao H 2017 *Materials and Design* **133** 266–287
4. Vargas-Uscategui A, King P C, Yang S, Chu C and Li J 2021 *Journal of Materials Processing Technology* **298** 117272
5. Sova A, Grigoriev S, Kochetkova A and Smurov I 2014 *Surface and Coatings Technology* **242** 226–231
6. Sova A, Grigoriev S, Okunkova A and Smurov I 2013 *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **69** 2269–2278
7. Zaikovskii V N, Klinkov S V, Kosarev V F, Melamed B M and Trubacheev G V 2014 *Thermophysics and Aeromechanics* **20** 223–230
8. Zaikovskii V N, Klinkov S V, Kosarev V F, Melamed B M and Trubacheev G V 2014 *Thermophysics and Aeromechanics* **21** 105–112
9. Valente A, Gitardi D and Carpanzano E 2020 *CIRP Annals* **69** 181–184
10. Li W Y, Liao H, Douchy G and Coddet C 2007 *Materials and Design* **28** 2129–2137
11. Li W Y and Li C J 2005 *Journal of Thermal Spray Technology* **14** 391–396
12. Liebersbach P, Foelsche A, Champagne V K, Siopis M, Nardi A and Schmidt D P 2020 *Journal of Thermal Spray Technology* **29** 400–412
13. Голуб В В, Иванов М Ф, Киверин А Д и Яковенко И С 2014 *Письма в Журнал технической физики* **40** 88
14. Голуб В В, Киверин А Д, Садохина Т Д и Яковенко И С 2018 *Письма в Журнал технической физики* **44** 87–94
15. Yakovenko I S and Kiverin A D 2021 *Acta Astronautica* **181** 620–632
16. Schiller L and Nauman A 1935 *VDI Zeitung* **77** 318–320