

В. С. Шикалов, С. В. Клинков, Н. С. Ряшин, В. Ф. Косарев

*Институт теоретической и прикладной механики
им. С. А. Христиановича СО РАН
ул. Институтская 4/1, Новосибирск, 630090, Россия*

v.shikalov@gmail.com, klyiii@yandex.ru, ryashin@itam.nsc.ru, vkos@itam.nsc.ru

ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ БРОНЗОВЫХ ЧАСТИЦ В ПОТОКЕ ИЗ ЭЖЕКТОРНОГО СОПЛА ДЛЯ ХОЛОДНОГО ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ*

Трехимпульсным теневым методом получена экспериментальная зависимость скорости сферических микро-частиц алюминиевой бронзы Metco 51F-NS (средний размер частиц 44 мкм, Oerlikon Metco, США) в потоке из осесимметричного эжекторного сопла с центральным телом от давления торможения, определяемого конфигурацией сопла с сохранением постоянного разрежения на срезе его центрального тела. Обнаружено, что данная зависимость имеет экстремум, в котором происходит смена знака производной, что отличает эжекторные сопла от типичных сопел Лавалья, применяемых в холодном газодинамическом напылении. В референтных экспериментах показано, что максимальные значения скорости микрочастиц из экспериментального эжекторного сопла близки к значениям скорости таких частиц в потоке из сопла Лавалья, соответствующих по давлению торможения. Полученные результаты открывают широкие перспективы применения эжекторных сопел с центральным телом и дозаторов открытого типа в условиях холодного газодинамического напыления.

Ключевые слова: эжекторное сопло с центральным телом, сопло Лавалья, двухфазный поток, скорость сферических микрочастиц, трехимпульсный теневой метод, холодное газодинамическое напыление.

Введение

Использование эжекторных сопел в холодном газодинамическом напылении позволяет применять для порошкового питания установки напыления дозатор открытого типа, работающий при атмосферном давлении [1; 2]. Как следствие, существенно упрощается система дозирования и подачи порошка, сокращаются ее паразитные объемы и, соответственно, резко снижаются потери материала в них, а также улучшается дозирование низкосыпучих материалов. Еще одним преимуществом такой схемы порошко-

вого питания является ввод частиц в ускоряющий поток после критического сечения сопла, что снижает его износ. Данное обстоятельство особенно важно в случае подачи высокотвердых частиц, которые существенно повышают абразивное воздействие потока на внутреннюю стенку сопла. Следует отметить, что особенности конструкции эжекторного сопла с центральным телом позволяют гибко варьировать параметры эжектирующего потока, влияющие на скорость частиц, которая является одним из критических параметров в холодном газодинамическом напылении [3–5]. Поэтому

* Работа выполнена благодаря финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 16-38-00832).

целью настоящей работы стало определение режима работы эжекторного сопла, а именно положения центрального тела в нем и давления торможения, обеспечивающих максимальную скорость частиц бронзы в потоке.

Эксперимент и результаты

Эксперименты по измерению скорости частиц проводились на стенде трехимпульсной теневой диагностики (ИТПМ СО РАН) с помощью экспериментального осесимметричного эжекторного сопла с центральным телом (рис. 1) и осесимметричного сопла Лавалья, широко применяющегося в холодном газодинамическом напылении. Диаметры входного сечения эжекторного сопла и критического сечения сопла Лавалья равня-

лись 5,5 и 2,7 мм соответственно, диаметры выходных сечений сопел были 7 и 6,5 мм соответственно. Длина эжекторного сопла составляла 150 мм, длина сверхзвуковой части сопла Лавалья равнялась 130 мм. Внешний и внутренний диаметры центрального тела эжектора были 8 и 2 мм соответственно, угол его конуса 28° . В качестве рабочего газа использовался воздух.

Измерение скорости частиц сфероидизированного порошка алюминиевой бронзы 51F-NS со средним размером частиц 44 мкм (Oerlikon Metco, США) проводилось на расстоянии 30 мм ниже по потоку от среза сопла трехимпульсным теневым методом, как описано в работе [6]. Микрофотография частиц данного порошка и их объемное распределение по размеру, полученное с помощью лазерного дифракционного анализатора, представлены на рис. 2.

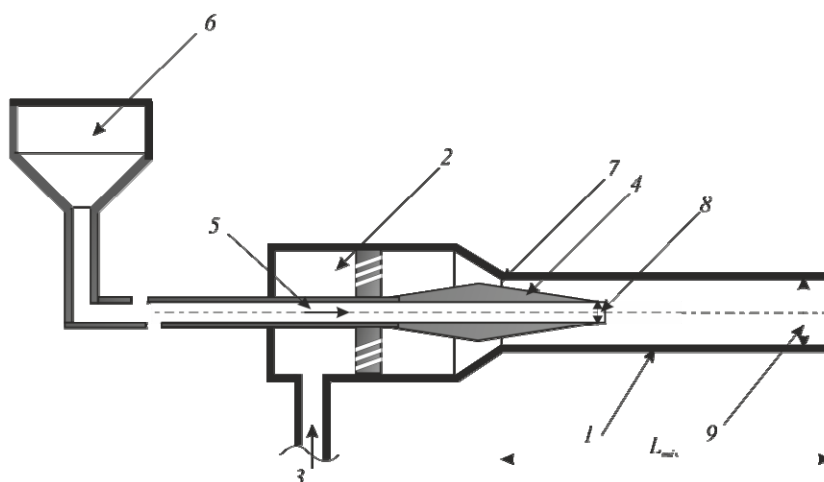


Рис. 1. Схема ХГН с эжекторным соплом и подачей порошка при атмосферном давлении: 1 – сопло; 2 – форкамера; 3 – подача газа; 4 – центральное тело; 5 – подача порошка; 6 – дозатор; 7 – критическое сечение; 8 – ввод частиц; 9 – выходное сечение

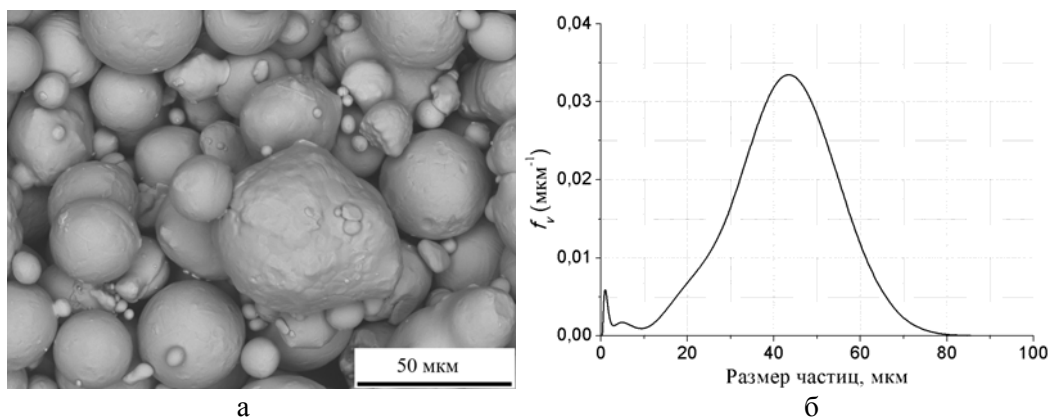


Рис. 2. Микрофотография частиц порошка бронзы Metco 51F-NS (а) и их объемное распределение по размеру (б)

Конструкция эжекторного соплового узла с центральным телом позволяет поддерживать постоянным разрежение на срезе центрального тела (выходе конической порошковой трубки) эжектора при варьировании давления торможения за счёт перемещения конуса центрального тела вдоль оси. В каждой точке по давлению измерена скорость не менее двухсот частиц и рассчитано ее среднее значение, а ошибка среднего составила не более 3 м/с. Графики полученных экспериментальных зависимостей скорости микрочастиц бронзы от давления торможения для эжекторного сопла и сопла Лавалья представлены на рис. 3.

Обсуждение результатов

Как видно из рис. 2, существует диапазон давлений в форкамере, когда скорость частиц в потоке достигает максимального значения 398 м/с и падает до 391 м/с. В этом интервале давлений скорости микрочастиц на выходе из предложенного экспериментального эжекторного сопла и типичного сопла Лавалья оказываются близки (различие примерно в 0,1 от максимальной скорости, полученной во всех экспериментах), поэтому можно предположить, что эжекторные сопла могут быть применены для формирования покрытий данным методом.

Наиболее вероятное объяснение наличия максимума скорости частиц, в котором производная меняет знак, заключается в особенности работы эжекторного сопла. Для увеличения давления в форкамере с сохранением разрежения на срезе центрального тела необходимо более глубоко вдвигать его в сопло. Отсюда следует, что в какой-то момент центральное тело начнет перекрывать поток эжектирующего газа, что может привести к падению скорости частиц. Поскольку на практике интересны коэффициенты напыления, то более подробный поиск наилучшего давления торможения, характерного для данного сопла, рациональнее проводить методом измерения коэффициента напыления, а не скорости частиц. Другими важными задачами остаются изучение влияния геометрии канала эжекторных сопел на максимальную скорость частиц и проверка полученных результатов с использованием других фракций и материалов порошков.

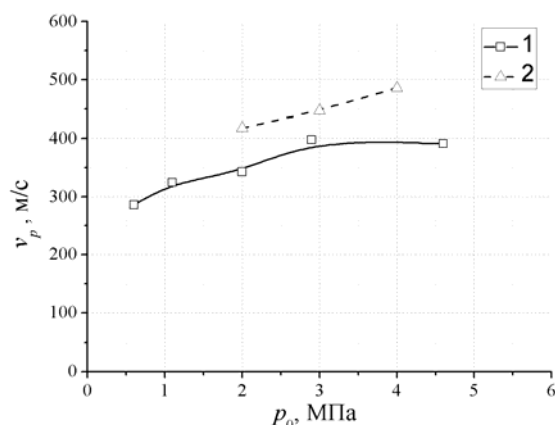


Рис. 3. Сравнение графиков зависимости скорости бронзовых частиц в потоках из осесимметричного эжекторного сопла и осесимметричного сопла Лавалья от давления торможения (1 – эжекторное сопло; 2 – сопло Лавалья)

Заключение

Получена экспериментальная зависимость скорости сферических микрочастиц бронзы 51F-NS в потоке из экспериментального эжекторного сопла с центральным телом. Обнаружен участок данной зависимости, на котором скорость частиц достигает максимума и начинает снижаться, что отличает эжекторные сопла от классических сопел Лавалья и необходимо учитывать при напылении. Экспериментально показано, что частицы бронзы достигают близких значений скорости как с использованием предложенного эжекторного сопла, так и с типичным соплом Лавалья, применяемым в холодном газодинамическом напылении. Полученные результаты открывают широкие перспективы применения эжекторных сопел с центральным телом и дозаторов открытого типа в условиях холодного газодинамического напыления.

Список литературы

1. Клинков С. В., Косарев В. Ф., Сова А. А. Исследование эжекторной схемы формирования гетерогенных сверхзвуковых потоков в условиях холодного газодинамического напыления // Теплофизика и аэромеханика. 2006. Т. 13, № 3. С. 387–397.
2. Косарев В. Ф., Клинков С. В., Лаврушин В. В., Сова А. А. Устройство газодинамического напыления порошковых мате-

риалов // Патент РФ № 2334827. БИПМ. 2008. № 27.

3. Алхимов А. П., Косарев В. Ф., Папырин А. Н. Метод “холодного” газодинамического напыления // Докл. АН СССР. 1990. Т. 315, № 5. С. 1062–1065.

4. Алхимов А. П., Косарев В. Ф., Папырин А. Н. Газодинамическое напыление. Экспериментальное исследование процесса напыления // Прикладная механика и техническая физика. 1998. Т. 39, № 2. С. 182–188.

5. Shikalov V. S., Klinkov S. V., Kosarev V. F. Cold spraying on materials with low erosion resistance // AIP Conference Proceedings. 2016. Vol. 1770. P. 040015. doi: 10.1063/1.4964084

6. Клинков С. В., Косарев В. Ф., Ряшин Н. С. Сравнение результатов экспериментов и моделирования холодного газодинамического напыления за маской. Часть 2 // Теплофизика и аэромеханика. 2017. Т. 24, № 2. С. 221–232.

Материал поступил в редколлегию 19.09.2017

V. S. Shikalov, S. V. Klinkov, N. S. Ryashin, V. F. Kosarev

*Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS
4/1 Institutskaya Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation*

v.shikalov@gmail.com, klyiii@yandex.ru, ryashin@itam.nsc.ru, vkos@itam.nsc.ru

MEASUREMENT OF BRONZE PARTICLES VELOCITY IN FLOW FROM THE COLD SPRAYING EJECTOR NOZZLE

The experimental dependence of spherical aluminum bronze microparticles Metco 51F-NS (mean particle size 44 μm , Oerlikon Metco, USA) in flow from the axially symmetric ejector nozzle with a central body on the stagnation pressure determined by a nozzle configuration with keeping constant vacuum at the central body cutoff. It is found that the dependence has an extremum in which derivative sign changes distinguishing ejector nozzles from the typical de Laval nozzles used in cold gas-dynamic spraying. It was shown in reference experiments that the maximum values of the microparticles velocity from the experimental ejector nozzle are close to the velocity values of such particles in the flow from the Laval nozzle corresponding to the stagnation pressure values. The obtained results open wide prospects to use ejector nozzles with a central body and open-type powder feeders in cold gas-dynamic spraying.

Keywords: ejector nozzle with a central body, de Laval nozzle, spherical microparticles velocity, three-pulse shadow method, cold gas-dynamic spraying.