

## ГАЗОПЛАМЕННОЕ НАПЫЛЕНИЕ С АКТИВИРОВАНИЕМ ВЫСОКОСКОРОСТНЫМ СПУТНЫМ ПОТОКОМ

Витязь П.А., Белоцерковский М.А., Черепко А.Е.

*Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск  
[mbelo@biz.by](mailto:mbelo@biz.by)*

**Введение.** Для обеспечения высокого качества покрытий (прочность сцепления более 50 МПа и пористость менее 8%) в практике газотермического напыления используют устройства, позволяющие повысить динамические параметры двухфазного потока и обеспечить скорость напыляемых частиц более 200 м/с. Достижение таких скоростей обеспечивается, как правило, за счет истечения газовых струй под определенным давлением через специальные сопла.

Принцип действия разработанных в США установок для высокоскоростного газопламенного напыления основан на том, что в образованную за счет сжигания в камере внутреннего сгорания при определенных условиях различных углеводородных топлив высокоэнергетическую струю, истекающую из сопла Лавалю, подают присадочный материал, который затем формирует покрытие. Однако высокоскоростные установки имеют камеры сгорания больших габаритов (длина ~ 270...350 мм), расходуют не менее 3,9 м<sup>3</sup>/ч пропана и до 3 м<sup>3</sup>/мин сжатого воздуха при давлении 0,4 и 0,6 МПа соответственно, что обуславливает возможность использования вышеуказанных устройств только в стационарных условиях.

Было предложено использовать спутные газовые потоки для повышения динамических параметров двухфазной струи [1]. В ходе теоретического анализа [1] было показано, что для достижения скорости частиц около 300 м/с, необходимо создать спутный поток,двигающийся со скоростью 900 – 1000 м/с.

Данная статья посвящена разработке оборудования, в котором для активирования процесса газопламенного напыления порошковых материалов используется спутный поток, имеющий высокую температуру и гиперзвуковую скорость движения. В качестве источника высокоэнергетического спутного потока рассматривается камера сгорания пропано-воздушной смеси. Необходимо было разработать такую конструкцию камеры, в которой сжигалось бы достаточно большое количество горючей смеси, и в то же время камера должна быть совместима с порошковым термораспылителем, имеющим относительно небольшие размеры.

**Разработка оборудования.** Выполненные расчеты показали, что размеры камеры при традиционном варианте сжигания смеси значительно превосходят размеры термораспылителя, т.е. компоновка камеры и пистолета в единую установку весьма затруднительна.

Применяя принцип микрофакельного сжигания газовойдушной смеси в каналах керамического перфорированного элемента для получения выходного высокоскоростного потока [2], были разработаны устройства, реализующих эффект микрофакельного горения в активаторах установок высокоскоростного напыления [3].

Первый вариант устройства для высокоскоростного газопламенного напыления включал камеру сгорания с соплом, огнеупорным перфорированным элементом, установленным в камере перпендикулярно ее оси и разделяющим объем камеры на полость смешения и полость сжигания рабочей смеси. В качестве узла подачи порошка использовался газопламенный термораспылитель, распылительная головка которого располагалась в осевом отверстии перфорированного элемента.

Наличие полости смешения позволяло улучшить условия смесеобразования при раздельной подаче компонентов для формирования горючей смеси и полностью

исключить использование дополнительного кислорода как в момент запуска устройства, так и на рабочем режиме. Кроме того, использование микрофакельного горения позволяет стабилизировать процесс сжигания газозоудшной смеси при одновременном увеличении скорости ее горения в каналах перфорированного элемента без отрыва и проскока, что, в свою очередь, дает возможность сжигать значительное количество горючей смеси в гораздо меньшем объеме. Причем, горение газа за перфорированным элементом, на его огневой поверхности, идет в зоне малой толщины в виде плоского пламени, без видимых языков, что позволяет резко сократить длину полости сжигания описываемого устройства.

Такое конструктивное исполнение дает возможность реализовать двухструйную схему газотермического напыления, когда первичный высокотемпературный поток, обладающий относительно невысокой скоростью, расплавляет транспортируемые частицы расходного материала, а вторичный, низкотемпературный, но высокоскоростной поток, разгоняет расплавленные частицы до скоростей более 250 м/с. Причем, первичный поток представляет собой высокотемпературную струю, производимую термораспылителем устройством для газотермического напыления, в то время как вторичный поток - это высокоскоростная струя продуктов сгорания топливно-воздушной смеси.

В ходе экспериментов были определены основные недостатки конструкции. Вылетающие из распылительной головки частицы порошка практически сразу же подхватываются высокоскоростным спутным потоком и, не успевая нагреться, разгоняются до скоростей выше 200 м/с. Для металлических порошков с размером частиц от 50 до 80 мкм такая схема напыления может быть допустима, но для частиц размером более 100 мкм, а также для порошков металлокерамики, керамики, и материалов с низкой теплопроводностью (ситаллов, стекол) ее использование не приносит ощутимых результатов. Кроме того, распылительная головка термораспылителя расположена непосредственно в полости сжигания рабочей смеси камеры, где температура достигает значений 1700 – 1900 К, что не позволяет эксплуатировать устройство в непрерывном режиме более 1,5 – 2 минут. Необходимость в периодических остановках устройства снижает производительности процесса более чем в 2 раза.

Учитывая это была разработана установка для активированного газопламенного напыления [4] с водоохлаждаемой камерой сгорания и керамическим мундштуком, выполненным в виде усеченного конуса. В отверстие большого основания керамического мундштука на расстоянии 100 – 140 мм от соплового отверстия установлена головка термораспылительного пистолета.

В данном устройстве в полной мере реализуется преимущество двухструйной схемы газопламенного напыления, когда высокоскоростной спутный поток из камеры сгорания разгоняет частицы порошка, предварительно нагретые в факеле термораспылителя. Факел термораспылителя изолирован от полости горения камеры и, таким образом, процессы, происходящие в полости горения не оказывают на него влияния. При этом распылительная головка также защищена от теплового воздействия камеры. Коническая форма керамического направляющего элемента позволяет не только сконцентрировать первичный поток, но и обеспечить более эффективное взаимодействие первичного и вторичного потоков, поскольку максимальное ускорение первичной струи достигается при ее взаимодействии со спутным потоком под углом  $20^{\circ}$  -  $50^{\circ}$ .

Экспериментальный образец термораспылителя с реактивным активатором был изготовлен на базе установки газопламенного напыления порошков ТЕРКО (рисунок 1 а). Первичный факел образуется в результате горения рабочей смеси газопла-

менного распылителя, на сопловой части которого монтируется реактивный активатор. При помощи специально предусмотренного регулировочного крана, ограничивающего подачу воздуха на смесеобразование, можно создавать либо окислительную, либо восстановительную атмосферу вторичного пламени.



а)



б)

а) порошковый термораспылитель с малогабаритным реактивным активатором; б) высокоскоростная струя, истекающая из активатора (видны скачки уплотнений)

Рис. 1. Установка высокоскоростного напыления с камерой микрофакельного горения

**Результаты экспериментов.** Исследования осуществлялись с использованием порошков оксида алюминия, карбида хрома, плакированного никелем, а также композиционной порошковой шихты, содержащей ферросплавы, частицы абразивного шлама, интерметаллиды и хромоникелевый сплав. Измерения, выполненные с помощью прибора ИССО-1 показали, что максимальная скорость, развиваемая частицами наиболее легкого порошкового материала –  $Al_2O_3$ , составляет 400 – 440 м/с, и достигается на дистанции 90 – 110 мм при соотношении окислителя (воздуха) и пропана  $\beta = 26...28$ . Напыленные покрытия имели пористость не более 7% и прочность сцепления 45...53 МПа.

**Выводы.** Предложено для получения выходного высокоскоростного спутного потока в активаторах газопламенных термораспылителей использовать принцип микрофакельного сжигания газовой смеси. Разработаны конструкции установок с малогабаритными камерами микрофакельного горения позволяющие осуществлять процесс напыления карбидов и окислов со скоростью полета частиц 360 – 440 м/с, что обеспечивает формирование покрытий с пористостью менее 7% и прочностью сцепления 45...53 МПа.

#### Литература

1. Витязь П.А., Белоцерковский М.А. Теоретические предпосылки активирования процесса газопламенного напыления спутными потоками // Порошковая металлургия: сб. науч. тр. – Минск: Беларус. навука, 2010. – Вып. 33. – С. 232 - 241.
2. Брюханов О.Н. Микрофакельное сжигание газов. – Л.: Недра. – 1983. – 192 с.
3. Устройство для высокоскоростного напыления покрытий (варианты) / Белоцерковский М.А., Прядко А.С., Черепко А.Е. // Патент РБ № 4365, Оpubл. 30.03.2002 г.
4. Устройство для высокоскоростного газотермического напыления / Белоцерковский М.А., Прядко А.С., Черепко А.Е. // Заявка на изобретение № 20091057 от 14.07.2009 г