

УДК 621.793

М.А. БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ, д-р техн. наук
Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск

ВОЗМОЖНЫЕ СХЕМЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СПУТНЫХ ГАЗОВЫХ ПОТОКОВ ПРИ ГАЗОПЛАМЕННОМ НАПЫЛЕНИИ ПОКРЫТИЙ

Статья посвящена созданию газопламенного оборудования и технологий, реализующих различные схемы активации спутными газовыми потоками. Рассмотрены разработанные автором процессы активированного напыления покрытий частицами тугоплавких материалов, термопластичных полимеров, материалов с низкой теплопроводностью.

Ключевые слова: газопламенное напыление, спутный поток, скорость частиц, свойства покрытий

Введение. Постановка задачи. Ранее было показано целесообразность активации процесса газопламенного напыления (ГПН) спутными потоками, повышающими скорость частиц напыляемого материала [1]. Показана экономичность и целесообразность данного подхода к созданию термораспылительных систем, отвечающих современным требованиям ремонтно-восстановительного производства. Предложена физическая модель, представляющая процесс напыления с независимым источником спутного потока в виде «трехслойной модели», описывающей движение двухфазной струи в искусственно созданном спутном потоке, который истекает в затопленное пространство. Разработана методика расчета динамических параметров турбулентных осесимметричных дозвуковых струй, которая позволяет аналитическим путем получить близкие к реальным значения скорости продуктов сгорания и частиц при ГПН [2]. Однако многообразие установок ГПН и применяемых при напылении материалов потребовало разработки различных схем активации спутными потоками, что и явилось задачей проведенных исследований. В данной статье рассматриваются возможные схемы использования спутных потоков для активирования процессов газопламенного напыления покрытий различного функционального назначения.

Активирование высокоскоростным спутным потоком. Теоретический анализ процесса газопламенного напыления с независимым источником спутного потока показал [1], что увеличение скорости движения частиц в осевом сечении газопламенного факела происходит не пропорционально увеличению скорости спутного потока. Причем, для увеличения скорости частиц до 300 м/с необходимо скорость газов в спутном потоке обеспечить до величин около 1000 м/с.

Следует отметить, что в процессе активации газопорошковой струи спутным потоком, имеющим гиперзвуковые скорости движения, необходимо чтобы влияние спутного потока на температуру частиц было минимально. Это возможно лишь в том случае, когда высокоскоростной спутный поток имеет температуру не менее 1500 К. Таким образом, формирование высокоскоростного спутного потока можно осуществить путем истечения

продуктов сгорания газозооной или газокислородной смеси из камеры, оснащенной соплом Лаваля (рисунок 1 а).

В качестве источника высокоэнергетического спутного потока предложена камера сгорания пропано-воздушной смеси, использующая принцип микрофакельного сжигания смесей в каналах керамического перфорированного элемента, и применяемая в аппаратах для гиперзвуковой металлизации [3]. Это позволило сжигать достаточно большое количество горючей смеси, и в то же время совместить камеру с порошковым термораспылителем, имеющим относительно небольшие размеры.

На основании теоретических исследований была разработана установка для активированного газопламенного напыления с водоохлаждаемой камерой сгорания и керамическим мундштуком, выполненным в виде усеченного конуса (см. рисунок 1 б) [4]. 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 газотермического напыления, когда высокоскоростной спутный поток из камеры сгорания разгоняет частицы порошка, предварительно нагретые в факеле термораспылителя. 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°–40° [1]. При помощи специально предусмотренного регулировочного крана, ограничивающего подачу воздуха на смесеобразование, можно создавать либо окислительную, либо восстановительную атмосферу вторичного пламени.

Экспериментальные исследования осуществлялись с использованием порошков оксида алюминия и карбида хрома, плакированного никелем. 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

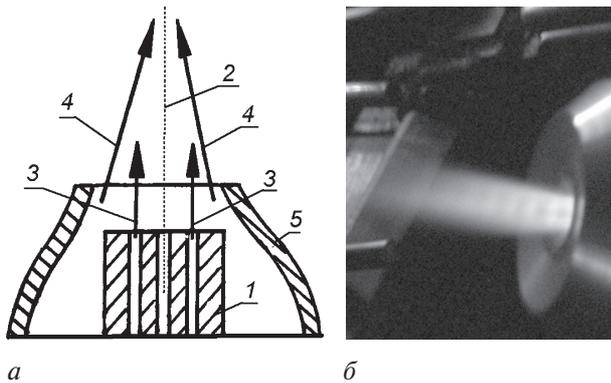


Рисунок 1 — Схема процесса газопламенного напыления со сверхзвуковым спутным потоком (а) и фото сверхзвуковой струи, истекающей из активатора (б): 1 — сопло термораспылителя; 2 — напыляемый порошок; 3 — основной факел; 4 — гиперзвуковой спутный поток; 5 — камера сгорания

90–110 мм при соотношении окислителя (воздуха) и пропана $\beta = 26–28$ (рисунок 2). Напыленные покрытия из карбида хрома имели пористость не более 7 % и прочность сцепления на отрыв 45–53 МПа.

Активирование низкоскоростным спутным потоком. Как следует из теоретического анализа процесса активирования газопламенного напыления спутными потоками [1], для увеличения скорости частиц размером около 50 мкм в 1,5–2 раза необходимо, чтобы скорость спутного потока превышала скорость основной струи в 1,3–1,6 раза. Наиболее простым методом повышения кинетических параметров газопорошкового потока является активация газовыми струями, обжимающими факел пламени и ускоряющими полет частиц (рисунок 3 а).

Разработанный воздушный активатор был выполнен таким образом, чтобы угол атаки струи воздуха по отношению к оси факела пламени мог изменяться от 0 до 70° (см. рисунок 3 б).

Экспериментальные исследования процесса воздушной активации выполнялись при напылении по-

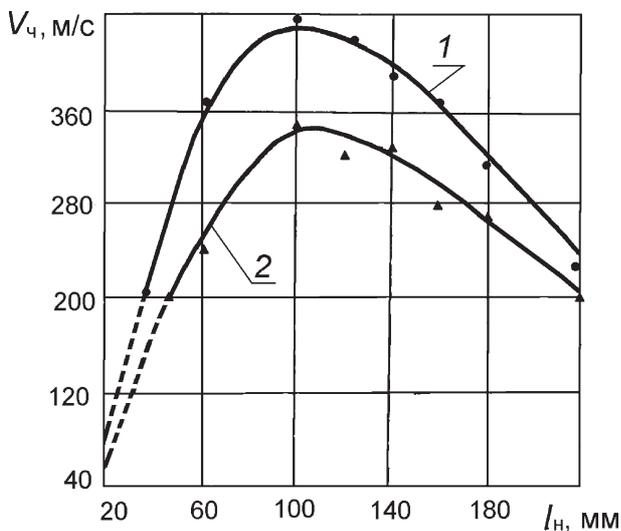
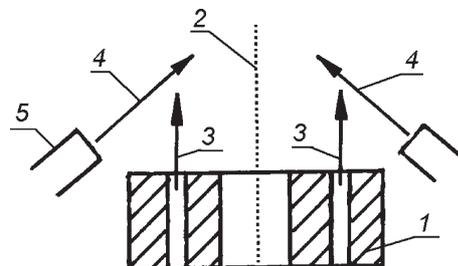


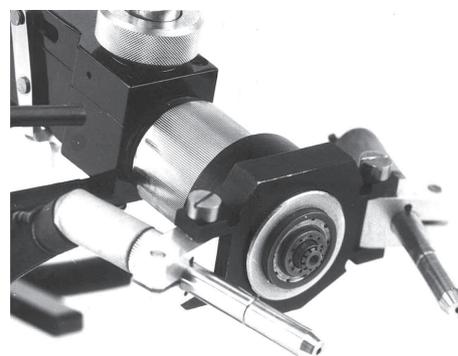
Рисунок 2 — Изменение скорости полета частиц порошков Al₂O₃ (1) и Cr₃C₂ (2) с увеличением расстояния от сопла термораспылителя

рошков окиси алюминия и карбида хрома, плакированного никелем. При нулевом угле, т. е. когда оси воздушных струй активатора параллельны оси факела, заметное увеличение скорости полета частиц на дистанции 100–150 мм удается получить при давлении воздуха в рукаве более 0,4 МПа (при расходе 0,35 м³/мин). Для увеличения скорости полета частиц окиси алюминия и карбида хрома с 40 до 52 м/с необходимо было увеличить давление до 0,55 МПа. На дистанции свыше 150 мм воздействие струи активатора незначительно.

С увеличением угла атаки струй скорость полета частиц на дистанции 100...150 мм возрастает, достигая своего максимума при углах атаки около 30°, т. е. на расстоянии около 100 мм от сопла термораспылительного пистолета. Дальнейшее изменение угла снижает скорость, и при углах более 55° струи оказывают тормозящее действие. Пористость покрытий также достигает минимума при углах около 30°. Повышение давления воздуха от 0,2 до 0,65 МПа в сопловых каналах воздушного активатора, изображенного на рисунке 3 б, вызывает пропорциональное увеличение скорости частиц (рисунок 4). С ростом размера частиц порошка снижается их максимальная скорость и удлиняется дистанция до точки максимального разгона. Поскольку время пребывания частиц в высокотемпературном потоке уменьшается с увеличением скорости, падает и степень их термической активации. Исходя из этого, активатор целесообразно использовать при напылении мелких фракций.



а



б

Рисунок 3 — Схема процесса газопламенного напыления с низкоскоростным спутным потоком (а) и реализующее схему устройство (б): 1 — сопло термораспылителя; 2 — напыляемый порошок; 3 — основной факел; 4 — спутный поток; 5 — источник спутного потока

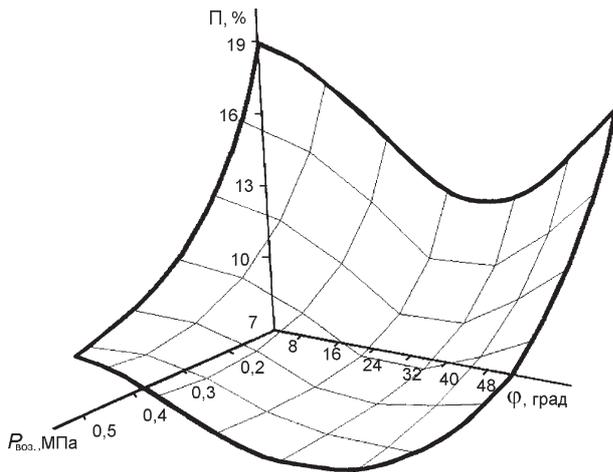
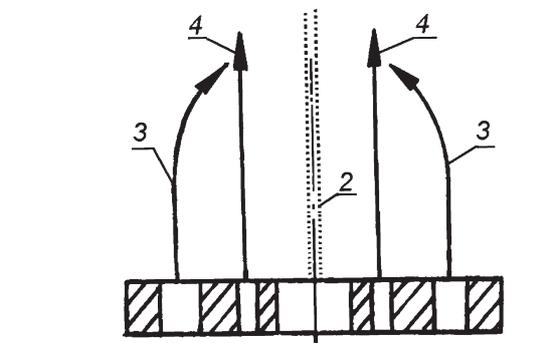
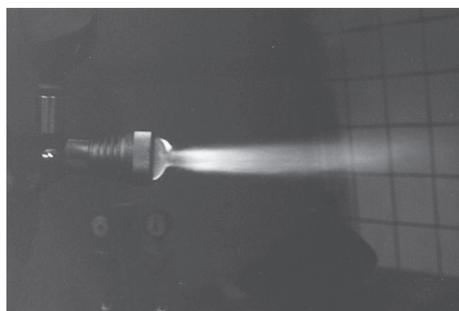


Рисунок 4 — Влияние давления в спутном потоке и угла атаки струй активатора на пористость покрытий Cr3C2 + Ni

Активирование спутным потоком, расположенным внутри факела. Рассмотрение варианта размещения спутного потока внутри кольцевого факела пламени показывает, что таким образом можно управлять процессом теплообмена между напыляемым порошком и пламенем, поскольку эффект эжектирования (рисунок 5 а) позволяет изменять диаметр факела: сужать факел при скорости истечения спутного потока больше скорости движения продуктов сгорания, формирующих факел (см. рисунок 5 б); расширять факел при скорости истечения меньше или равной скорости движения продуктов сгорания.



а



б

Рисунок 5 — Схема использования внутреннего спутного потока в качестве газодинамического активатора (а) и форма факела (б): 1 — сопло термораспылителя; 2 — напыляемый порошок; 3 — факел пламени; 4 — воздушный поток (газодинамический активатор)

На данном принципе газодинамической активации была разработана конструкция термораспылителя для ГПН порошков полимерных материалов [5], обеспечена возможность управления теплофизическими характеристиками факела путем изменения соотношения скоростей выхода компонентов горючей смеси (пропана и воздуха), порошка и воздуха в зазоре между мундштуком и сопловым накопником (см. поток 4 на рисунке 5 а). Поток воздуха является газодинамическим активатором, с помощью которого изменяется форма факела и, соответственно, его плотность теплового потока, обеспечивая таким образом возможность напыления порошков полимеров с температурой плавления от 360 до 550 К (таблица).

Использование спутного потока в качестве дополнительного факела. Источником внутреннего спутного потока может являться также еще один факел, однако такой вариант имеет смысл только в том случае, когда вторичный факел зажигается на некотором расстоянии от среза сопла термораспылителя, а именно на расстоянии, где частицы достигли максимально возможной температуры от нагрева в первичном факеле (рисунок 6 а).

Известно, что при высоких скоростях истечения струи формирующих пламя газов, факел отрывается от сопла и устанавливается на некотором расстоянии над ним. Пламя такого типа в зарубежной литературе называют «приподнятым», а в отечественной — «горящим с отрывом».

Используя эффект горения с отрывом было предложено образовывать вторичный факел на некотором расстоянии от сопла термораспылителя за счет высокой скорости подачи рабочей смеси. При этом возможно несколько вариантов газопламенного напыления с использованием комбинированного факела, один из которых заключается в том, что вторичный факел зажигается внутри соосно ему

Таблица — Режимы напыления полимеров с различной температурой плавления

Температура плавления полимера, К	Плотность теплового потока, Вт/м ²	Размер частиц, мкм			Вид факела	
		до 100	100–200	200–400		
360–410	2 · 10 ⁶	β	24/1	23,5/1	23/1	Расширен
		*	90/6/4	88/8/4	86/10/4	
420–510	3,4 · 10 ⁶	β	22,5/1	22/1	21,5/1	Не изменен
		*	82/13/5	80/15/5	78/17/5	
510–50	Более 5 · 10 ⁶	β	21/1	20,5/1	20/1	Сужен (рис. 5 б)
		*	75/19/6	73/21/6	71/23/6	

Примечание: β — соотношение окислителя (воздух) и горючего газа (пропан) в смеси; * — распределение воздуха в % (± 1 %) в горючую смесь/на транспортировку порошка/в кольцевой зазор

расположенного первичного, а порошок транспортируют вдоль оси факелов (см. рисунок 6 а).

Зажигание вторичного факела необходимо осуществлять в той зоне, где снижение тепловых параметров первичного факела настолько ощутимо, что прекращается рост температуры частиц. Исходя из этого была выполнена теоретическая оценка расстояния Lx , в результате которого определили, что для частиц размером около 50 мкм величина Lx находится в пределах 140...170 мм.

Возможность возникновения явления отрыва пламени зависит от сечения сопла, определяющего скорость истечения горючей смеси при данном ее расходе, и от состава смеси, обуславливающей расход и скорость распространения пламени. Для определения диаметра проходного сечения сопла использовали формулу, предложенную в работе [6]:

$$V_{cm} = 125 \gamma_{cm} D_{\alpha}, \quad (1)$$

где V_{cm} — предельно допустимая скорость истечения смеси из сопла, м/с; γ_{cm} — коэффициент скорости распространения пламени горючей смеси, c^{-1} ($\gamma_{cm} = 1$ — для стехиометрической смеси кислорода с ацетиленом; $\gamma_{cm} = 0,27$ — для стехиометрической смеси кислорода с пропан-бутаном); D_{α} — эффективный диаметр, м ($D_{\alpha} = d_c^{0,37}$, где d_c — диаметр сечения сопла, м).

Скорость истечения горючей смеси может быть определена также из следующего выражения [7]:

$$V_{cm} = \frac{k_g G_s}{d_c n_k}, \quad (2)$$

где G_s — расход горючей смеси вытекающий из сопла, m^3/c ; n_k — число каналов в сопловом наконечнике; k_g — коэффициент, равный $354, m^{-1}$.

Решая совместно выражения (1) и (2), получили формулу для определения величины критического расхода горючей смеси, ниже которой

факел горит у среза сопла, а выше возникает явление отрыва:

$$G = \frac{125 d_c D_{\alpha} n_k \gamma_{cm}}{k_g}. \quad (3)$$

Подставляя значения n_k и d_c , соответствующие диаметрам сопловых отверстий и их числу у аппаратов типа УПТР и у газосварочных горелок типа ГС-57, ГСМ-53, получили, что предельное количество ацетилен-кислородной смеси больше на 25...40 %, чем предельное количество пропан-кислородной смеси. Исходя из чего, более целесообразно для формирования вторичного факела использовать пропан-кислородную смесь.

Исследования, выполненные на модернизированном термораспылителе (см. рисунок 6 б) показали, что при использовании удлиненного факела удается формировать покрытия из порошков с теплопроводностью 2–5 Вт/м · град (стеклоэмалей). Анализ результатов исследования температуры факела с помощью калориметрического зонда показал, что активную зону факела удалось увеличить на 100–150 мм (рисунок 7), причем дистанция напыления материалов с низкой теплопроводностью может составить 300–350 мм. Затраты на нанесение покрытий несколько возросли в связи с увеличением расходов рабочих газов. Но, учитывая относительно небольшую стоимость пропана и кислорода, общая себестоимость процесса осталась гораздо ниже, чем других методов газотермического напыления.

Помимо непосредственного влияния спутных потоков на динамические и теплофизические параметры двухфазной струи, необходимо отметить также и возможность переноса спутными потоками других видов энергии, например, энергии колебаний с определенными частотно-амплитудными характеристиками.

Заключение. Для активирования процесса газопламенного напыления порошковых материалов рассмотрены возможные схемы использования спутных потоков, расположенных как снаружи, так и внутри основного факела с напыляемым материалом. Выполнены экспериментальные ис-

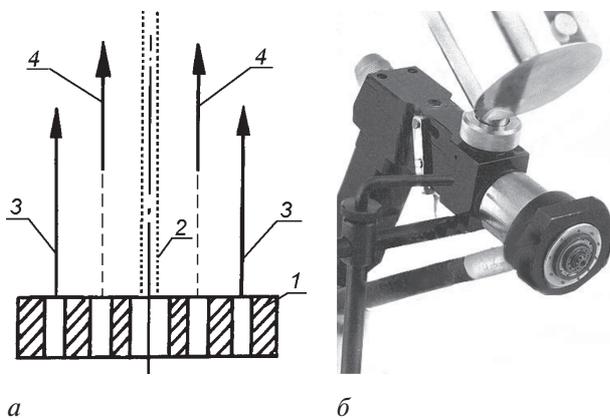


Рисунок 6 — Схема использования внутреннего спутного потока в качестве дополнительного факела (а) и реализующее схему устройство (б): 1 — сопло термораспылителя; 2 — напыляемый порошок; 3 — основной (первичный) факел; 4 — спутный (вторичный) факел

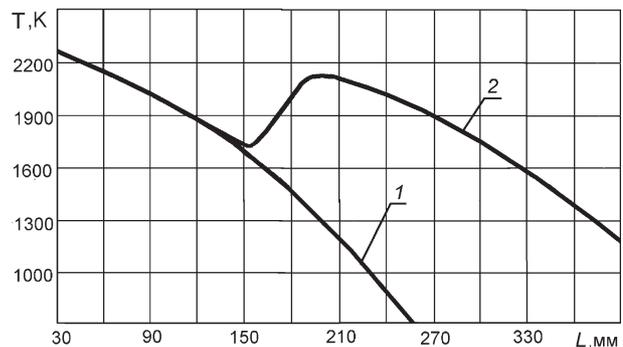


Рисунок 7 — Изменение температуры по оси пропан-бутан кислородного факела (1) и комбинированного факела (2)

следования процесса газопламенного напыления порошковых материалов спутным потоком, имеющим высокую температуру и гиперзвуковую скорость движения. Разработана конструкция установки с малогабаритной камерой микрофакельного горения, позволяющей 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.

Показано, что за счет эффекта эжектирования от спутного потока можно изменять форму факела и, таким образом, управлять плотностью теплового потока. Разработанное оборудование, использующее этот эффект, позволяет напылять порошки термопластичных полимеров с температурой плавления от 360 до 550 К.

Увеличена протяженность «активной» зоны пламени путем формирования вторичного факела, горящего с отрывом на некотором расстоянии от сопла термораспылителя за счет высокой скорости подачи рабочей смеси. Разработанный термораспылитель за счет «двойного» факела обеспечивает формирование покрытий из порошков материалов с низкой теплопроводностью (от 2 до 5 Вт/м · град).

Список литературы

1. Белоцерковский, М.А. Анализ процесса взаимодействия газопламенного факела и независимого спутного потока // Механика машин, механизмов и материалов. — 2013. — № 2(23). — С. 68–73.
2. Витязь, П.А. Теоретические предпосылки активирования процесса газопламенного напыления спутными потоками / П.А. Витязь, М.А. Белоцерковский // Порошковая металлургия: сб. науч. тр. — Минск: Беларус. навука, 2010. — Вып. 33. — С. 232–241.
3. Черепко, А.Е. Технологии гиперзвуковой металлизации / А.Е. Черепко, М.А. Белоцерковский, А.С. Прядко // Механика-2011: сб. научн. докл. V Белорус. конгресса по теоретич. и прикладной механике, 26–28 окт. 2011 г.: в 2 т. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси: редкол.: М.С. Высоцкий [и др.]. — Минск, 2011. — Т. 2 — С. 138–143.
4. Устройство для высокоскоростного газотермического напыления порошков: пат. № 14885 Респ. Беларусь, МПК В05В 7/16 / М.А. Белоцерковский, А.С. Прядко, А.Е. Черепко; заявитель Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси. — № а20091057; заявл. 14.07.2009; опубл. 30.10.2011 // Афіцыйны бюл./Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. — 2011. — № 5. — С. 88.
5. Белоцерковский, М.А. Технологические параметры газопламенного напыления покрытий термопластичными полимерами / М.А. Белоцерковский, А.В. Чекулаев, В.А. Кукарко // Механика машин, механизмов и материалов. — 2009. — № 3. — С. 69–74.
6. Нинбург, А. К. Газопламенная обработка металлов с использованием газов-заместителей ацетиленом / А. К. Нинбург. — М.: Машиностроение, 1976. — 152 с.
7. Нечаев, В.Д. К расчету дозирующих каналов и сопел огневой аппаратуры / В.Д. Нечаев // Тр. ВНИИАВТОГЕН. — М.: Машгиз, 1963. — Вып. 9. — С. 33–39.

Belotserkovsky M.A.

Options schemes the use of cocurrent flows in flame spraying coatings

The article discusses the creation of flame spraying equipment and technologies that implement the various activation schemes of the co current gas flows. Processes of activated flame spraying with different powders (oxides, carbonitrides, thermoplastic polymers, materials with low thermal conductivity) have been developed.

Keywords: flame spraying, current flow, particle velocity, properties of coatings

Поступила в редакцию 10.02.2014.