

УДК 621.793.71

Ю. И. Евдокименко, В. М. Кисель

ГОРЕЛКИ ДЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ГАЗОПЛАМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ: ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ СХЕМ И КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ

Проведено аналіз впливу схемних та конструктивних ознак пальників для високошвидкісного газополуменевого напилення на їх енергетичну ефективність. Показано, що конфігурація соплового каналу пальника є основним фактором, що визначає ефективність міжфазового енергообміну в ній. Наведено результати розрахункового порівняння ефективності нагрівання і розгону частинок в каналах різної конфігурації. Розглянуто конструкції основних промислових пальників для високошвидкісного киснево-паливного та повітряно-паливного напилення; на прикладі експериментальних пальників показано перспективність схем пальників з функціональним розподілом ділянок нагрівання і розгону частинок порошку.

Ключові слова: високошвидкісне газополуменеve напилення, пальники для високошвидкісного киснево-паливного і повітряно-паливного напилення, енергетична ефективність, пальники з функціональним розподілом ділянок нагрівання та розгону частинок порошку.

Введение

За двадцать пять лет своего развития высокоскоростное газопламенное напыление (ВГПН, в англоязычном варианте High Velocity Flame Spraying, HVFS) прочно утвердилось в качестве одного из основных методов газотермического напыления (ГТН) [1], и в настоящее время широко применяется практически во всех отраслях промышленности для нанесения различных функциональных покрытий [2]. На международной конференции-выставке по газотермическому напылению ITSC-2010 (Сингапур) из 270 докладов 25% было посвящено проблематике ВГПН (больше – 43% — только плазменному напылению) [3].

Суть ВГПН заключается в нагреве и разгоне частиц напыляемого материала высокоскоростным высокотемпературным потоком продуктов сгорания углеводородного топлива, непрерывно сгорающего при давлении, обеспечивающим его сверхзвуковое истечение из горелки. Соответственно, физические процессы при ВГПН наиболее близки к процессам при обычном газопламенном напылении (ГПН) и при детонационном напылении. ВГПН позволяет наносить покрытия практически из всех применяемых в газотермическом напылении материалов (за исключением наиболее тугоплавких соединений). При этом их качество соизмеримо с качеством лучших детонационных и плазменных покрытий или даже превосходит их — типичной является пористость на уровне 1% и менее [4], адгезионная прочность во многих случаях превосходит 100 МПа и является максимальной среди методов ГПН. Так, авторы [5] сообщают о полученной ими адгезионной прочности покрытий состава WC – 20% (мас.) Ni-суперсплав на уровне

260–280 МПа. По производительности (до 30 кг/ч наносимого порошка) метод уступает только электродуговой металлзации. По своим размерам и весу горелки для высокоскоростного газопламенного напыления мало отличаются от горелок для ГПН, что позволяет использовать их в качестве ручного инструмента. Основным недостатком ВГПН является большой удельный (на единицу массы покрытия) расход горючего и окислителя, определяющий относительно высокую стоимость процесса. Совершенствование техники и технологии ВГПН направлено в первую очередь на повышение энергетической эффективности. В данной работе проведен анализ существующих конструктивных схем ВГПН-горелок с точки зрения эффективности использования в них внутренней энергии продуктов сгорания для достижения энергетических параметров частиц напыляемого материала — их скорости и удельной энтальпии, необходимых для образования адгезионных и когезионных связей в покрытии.

Определяющие признаки конструктивных схем горелок для ВГПН

Энергетические параметры частиц на выходе из горелки определяются тремя группами факторов. Первую из них образует комплекс теплофизических свойств самого напыляемого материала (плотность, теплоемкость, температура и теплота плавления) и определяющие размеры и форма частиц его порошка. Две другие связаны с применяемой топливной композицией (окислитель, горючее, их соотношение, давление сжигания) и с конструкцией горелки (ее мощность, протяженность и форма газодинамика).

- применяемый окислитель — кислород, воздух или их смесь (обогащенный воздух);
- применяемое горючее и его агрегатное состояние — газообразное или жидкое;
- тип охлаждения — жидкостное или воздушное;
- конфигурация соплового канала;
- система ввода напыляемого материала — осевая или радиальная.

Каждый из этих признаков непосредственно влияет на процессы энергообмена в горелке, а весь комплекс технических решений, их реализующих, полностью определяет ее конечную энергетическую эффективность и, таким образом, техническое совершенство устройства.

В зависимости от вида применяемого окислителя различают две основных разновидности ВГПН — высокоскоростное кислородно-топливное напыление (ВКТН) и высокоскоростное воздушно-топливное напыление (ВВТН), в англоязычной литературе обозначаемые терминами HVOF и HVAF (High Velocity Oxygen/Air Fuel). Особенности технологии ВКТН подробно освещены в современных пособиях по ГТН [1, 2, 4], а ВВТН является относительно новой технологией, ее подробная характеристика приведена в [6, 7]. Основное отличие между этими технологиями определяется максимальными уровнями температур, достигаемыми при сжигании кислородно-топливных и воздушно-топливных смесей — 2900–3300 К (в зависимости от вида горючего, соотношения компонентов и давления) в первом случае и 1900–2300 К — во втором. Использование воздуха в качестве окислителя существенно снижает стоимость процесса, но сужает диапазон напыляемых материалов за счет тугоплавких материалов.

В качестве горючего в обеих технологиях применяют горючие газы (метан, пропан, пропилен, водород), промышленные газовые смеси (МАПП, МАФ) или жидкие горючие (керосин); соответственно, различают горелки, работающие на горючих газах, и жидкотопливные горелки. Хотя покрытия, описанные в первом, относящемся к ВКТН, патенте [8], были получены при работе на ацетилене, в современных системах ВГПН его практически не используют из-за нестабильности при повышенном давлении. Сравнение характеристик ВКТН-горелок, работающих на газообразном и жидком горючем, проведено в [9]. Конструктивной особенностью жидкотопливных горелок является применение камер сгорания (КС) большого объема, необходимого для обеспечения качественного смесеобразования. Увеличение поверхности теплообмена при высоких температурах в КС существенно увеличивает тепловые потери в систему охлаждения, соответственно, снижая тепловую эффективность устройства.

Как правило, горелки для ВКТН имеют водяное охлаждение, а для ВВТН — воздушное регенеративное, при котором нагретый воздух из системы охлаждения поступает в КС. Водяное охлаждение позволяет поддерживать температуру горячих поверхностей камеры сгорания и соплового канала горелки на уровне, не превышающем $600\text{ }^{\circ}\text{C}$, что обеспечивает их высокий ресурс, но приводит к высоким тепловым потерям. В случае воздушного охлаждения температура горячих стенок, контактирующих с высокотемпературными продуктами сгорания, определяется возможностью противостоять высокотемпературному окислению в течение заданного ресурса; для обычно применяемых высоколегированных сталей и никелевых сплавов составляет $800\text{--}1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ на протяжении нескольких десятков часов. Обычно для интенсификации охлаждения применяют частично регенеративное охлаждение, при котором в горелку подается больше воздуха, чем необходимо для сжигания горючего, и его избыток сбрасывается в конце охлаждающих каналов. При этом повышение ресурса горячих элементов устройства сопровождается снижением его энергетической эффективности за счет уноса части тепла и увеличения (в $1,5\text{--}2$ раза) расхода сжатого воздуха.

Конфигурация соплового канала и место ввода дисперсной фазы в газовый поток являются наиболее значимыми конструктивными факторами, определяющими процессы межфазного энергообмена в горелке. Дисперсная фаза может подаваться в поток продуктов сгорания либо в виде порошкового материала, либо в виде капель расплава, срывааемых потоком с конца проволоки (прутка, шнура), вводимого в горячую зону. Ввод дисперсной фазы в газовый поток может быть осевым, то есть направленным в сопло по его оси, или радиальным, когда подача его происходит через радиальные отверстия в стенке соплового канала. В данной работе рассматриваются горелки, предназначенные для нанесения покрытий из порошковых материалов, особенностью которых является необходимость не только разгона дисперсных частиц, но и их нагрева до температуры, требуемой для образования покрытия. На рис. 1 приведены схемы сопловых каналов промышленных горелок для ВГПН (А – Г), схема экспериментальной двухкамерной горелки (Д) и возможные расположения на них мест ввода порошка. Очевидно, что осевой ввод обеспечивает большее время нахождения частиц в канале и больший их прогрев.

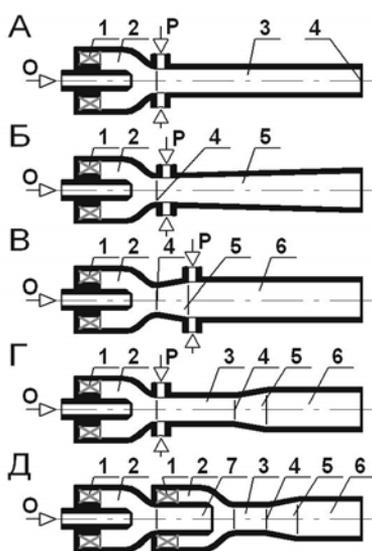


Рис.1. Схемы сопловых каналов горелок для ВГПН и места ввода в них напыляемого материала:

1 — устройство смешения и ввода топливных компонентов, 2 — камера сгорания, 3 — дозвуковой цилиндрический участок, 4 — сечение достижения газовым потоком скорости звука, 5 — сверхзвуковой конический участок, 6 — сверхзвуковой цилиндрический участок, 7 — канал нагрева порошка, O — осевой ввод порошка, P — радиальный ввод порошка

Характеристика сопловых каналов горелок и их энергетическая эффективность

Нагрев частиц определяется временем их нахождения в высокотемпературном газовом потоке, а достигаемая ими скорость — длиной, на которой происходит их разгон в нем. Поэтому протяженность соплового канала является основным параметром, определяющим эффективность межфазового энергообмена. При этом длина канала, в котором происходит высокоскоростное течение горячего газа с определенным расходом, имеет технические и физические ограничения, определяемые термогазодинамическими процессами.

В цилиндрическом сопловом канале (схема А, рис. 1) газовый поток на всей его длине имеет дозвуковую скорость и лишь в выходном сечении он достигает скорости звука. Длина такого дозвукового разгонного канала (ДЗРК) ограничена лишь дистанцией, на которой сохраняется необходимая для разогрева частиц температура газового потока.

В сверхзвуковых разгонных каналах (СЗРК) схем Б и В (рис. 1) скорость газового потока уже в передней их части (в сечении с минимальной площадью) достигает скорости звука, а в конце конического участка — своего максимального значения. Длина конического СЗРК (схема Б) ограничена максимально возможным диаметром выходного сечения при минимальном угле раскрытия конуса, обеспечивающим в нем сверхзвуковую скорость потока. Максимальная длина цилиндрического СЗРК (схема В) ограничена располагаемым перепадом давлений между камерой сгорания и окружающей средой, обеспечивающая в нем сохранение сверхзвукового течения.

Сопловой канал схемы Г (рис. 1) является комбинацией ДЗРК и цилиндрического СЗРК, а предельная длина такого комбинированного разгонного канала (КРК) определяется соответствующими ограничениями на длины его до- и сверхзвукового участков. Падение давления в дозвуковой части КРК снижает степень расширения в коническом сверхзвуковом сопле, поэтому максимальная скорость газа в нем ниже достигаемой в канале схемы В, а сверхзвуковой участок имеет меньшую длину.

Двухкамерная горелка (схема Д, рис. 1) реализует предложенную в патенте [10] концепцию расходного управления параметрами двухфазного потока,

позволяющую функционально разделить газодинамический тракт горелки на участки нагрева и разгона частиц, в которых параметры газового потока наиболее благоприятны для проведения этих процессов. При подаче в первую по потоку КС некоторой части (15%–40%) всего расхода топливных компонентов значения давления, скорости и температуры газа в канале между камерами сгорания почти не отличаются от значений этих параметров в КС. Это позволяет в разы увеличить время их пребывания в высокотемпературной зоне тракта горелки. Очевидно, что длина межкамерного канала нагрева ограничена так же, как и длина ДЗРК, а разгонный канал после второй КС представляет собой КРК с рассмотренными выше ограничениями на его длину.

Методология и результаты расчета энергетической эффективности сопловых каналов горелок, показанных на рис. 1, изложены в работе [11]. Каналы рассматривались при одинаковых давлении в КС (1,0 МПа) и тепловой мощности (156 кВт, топливная пара — кислород-керосин), их длину принимали максимальными с учетом указанных ограничений, в качестве дисперсной фазы были взяты частицы диоксида циркония (25 мкм) с расходом, составляющим 7% (мас.) расхода газа. Результаты расчета длины канала L_{Σ} , скорости V_p и температуры T_p частиц, а также условного коэффициента полезного действия горелки $\eta_{гор}$ (отношения энергии, переданной дисперсной фазе газом к тепловой мощности горелки) приведены в табл. 1.

Таблица 1

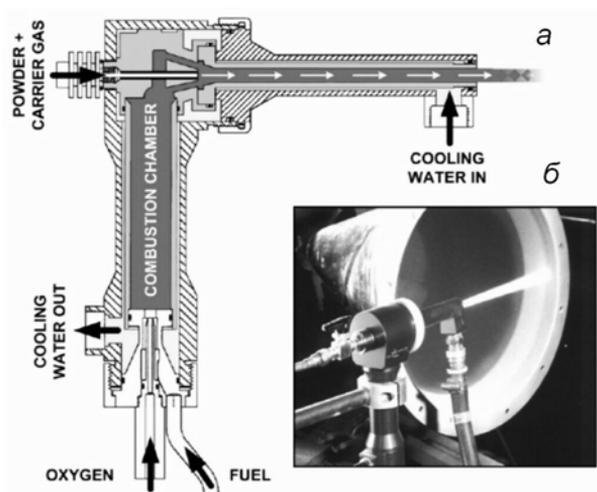
**Энергетические параметры частиц при предельных длинах каналов
ВГПН-горелок различной конфигурации**

Схема канала	L_{Σ} , мм	V_p , м/с	T_p , К	$\eta_{гор}$, %
А	350	526	2440	7,5
Б	190	710	1310	4,4
В	220	763	1275	4,4
Г	350	767	2120	7,3
Д	360	783	2625	9,0

Данные таблицы показывают, что при дозвуковом течении в канале обеспечивается более эффективный нагрев частиц дисперсной фазы, а при сверхзвуковом — их более эффективное ускорение. При этом общая энергетическая эффективность сверхзвуковых каналов, оцениваемая условным к.п.д., является минимальной среди всех конфигураций. Комбинированные каналы обеспечивают соизмеримую с дозвуковыми каналами общую эффективность, эффективность ускорения в них не ниже, чем в сверхзвуковых каналах, а эффективность нагрева лишь несколько уступает дозвуковым. Необходимо отметить, что в расчете были приняты равные длины до- и сверхзвукового участков канала, но очевидно, что за счет варьирования их соотношения возможно регулирование параметров частиц в диапазоне значений, достигаемых в до- и сверхзвуковых каналах. Максимальной эффективностью обладает двухкамерная схема, обеспечивающая наиболее высокую эффективность как нагрева частиц, так и их ускорения. При соизмеримой общей длине в тракте этой схемы процесс нагрева частиц длится вдвое дольше, чем в ДЗРК, результатом чего оказывается более высокая их температура, достигаемая к тому же при максимальной их скорости.

Промышленные горелки для высокоскоростного газопламенного напыления

В настоящее время на рынке оборудования для ВКТН доминируют три основных американских производителя (Deloro Stellite, Sulzer Metco, Praxair) с горелками четырех типов конструктивных схем. Первой промышленной горелкой, появившейся на нем в середине 1980-х годов, была модель Jet Kote, созданная одним из пионеров ВГПН Д. Браунингом (James A. Browning) на основе его патента [12]. В настоящее время этот патент с серией дополнений принадлежит компании Deloro Stellite, выпускающей горелку Jet Kote 3000 с той же схемой (рис. 2). Схема Jet Kote (ЖК) отличается расположением соплового канала под прямым углом к оси камеры сгорания с целью обеспечения осевого подвода в него порошка для повышения ее тепловой эффективности. Хотя такая схема наиболее подходит для работы на жидком горючем, в таком варианте горелки не производятся. Недостатком схемы ЖК является высокий уровень тепловых потерь в систему водяного охлаждения (по экспериментальным данным ее изобретателя — до 30% [13]), обусловленный относительно большим объемом КС и наличием системы каналов в узле поворота потока. Тем не менее, сочетание осевого ввода порошка с дозвуковым сопловым каналом обеспечивает схеме ЖК максимальную среди всех промышленных ВКТН-горелок тепловую эффективность [2], что позволяет напылять керамические покрытия.



a — конструктивная схема, *б* — горелка в процессе работы

Рис. 2. Горелка для ВКТН Jet Kote 3000 компании Deloro Stellite [14]: powder + carrier gas — порошок + транспортирующий газ; oxygen — кислород; fuel — горючий газ; cooling water in (out) — вход (выход) охлаждающей воды; combustion chamber — камера сгорания

Горелка работает на горючих газах (водороде, метане, пропане, пропилене или этилене), имеет дозвуковые цилиндрические сопловые каналы длиной 76, 152, 229 и 305 мм (3", 6", 9" и 12"), ее технические характеристики [15] приведены в таблице 2.

Таблица 2

Технические характеристики промышленных горелок для ВГПН

Метод: модель горелки (компания)	Горючее / Расход, г/с	Окислитель / Расход, г/с	Давление в КС, МПа	Производительность, г/с, (WC)	Тепловая мощность, кВт	КИП, %, (WC)
HVOF (газ. горючее): JK3000 (Deloro Stellite)	Водород / 0,7 или пропан* / 1,7	Кислород / 6,5	0,4	0,6	85	–
HVOF-1: 9ADJHE (Sulzer Metco)	Водород / 1,1 или пропан* / 2,8	Кислород / 7,3 + воздух / 9,1	0,38	0,65	133	–
HVOF-Hybrid: 2700DJH (Sulzer Metco)	Водород / 1,1 или пропан* / 2,8	Кислород / 7,3 + воздух / 9,1	до 0,55	0,65	133	70
HVOF (жидк. горючее): JP5220 (Praxair)	Керосин / 7,15	Кислород / 25,3	до 0,82	2,5	307	47
HVOF (жидк. горючее): WokaStar (Sulzer Metco)	Керосин / 6,75	Кислород / 23	0,55–0,83	3,3	290	50
AC-HVAF: M3 (UniqueCoat Technologies)	Пропан, (метан, пропилен) / 7,9	Воздух (всего) / 156	0,55	8,3	375	66
HVAF gun (Университет им. Н.Манделы, ЮАР)	Керосин / 4,0	Воздух (всего) / 60	0,58	2,5	172	45
TC-HVAF (Gradient)	Метан / 2,7	Воздух (всего) / 92	1,0	3,5	136	65

* В качестве горючего могут использоваться также природный газ, метан, пропилен, этилен

Корпорация Sulzer Metco на базе пакета патентов под торговой маркой Diamond Jet производит два модельных ряда горелок, один из которых имеет воздушное охлаждение, а второй — комбинированное (воздушное и водяное). Горелки Diamond Jet работают исключительно на горючих газах, подаваемых в КС через головку, конструкция которой во многом воспроизводит горелку для традиционного ГПН этой же компании, а сама камера сгорания образована внутренней полостью насадка, пристыкованного к головке. КС имеет коническую форму и одновременно выполняет функцию дозвукового участка сопла. Конструктивная схема воздухоохлаждаемых горелок серии Diamond Jet (DJ), основанная на патенте 1989 г. [16], показана на рис. 3. В этой схеме отсутствует протяженный сопловой канал, характерный для всех остальных ВГПН-горелок, процессы нагрева и разгона частиц после их истечения из очень короткого тракта горелки происходят в основном в свободной сверхзвуковой струе.

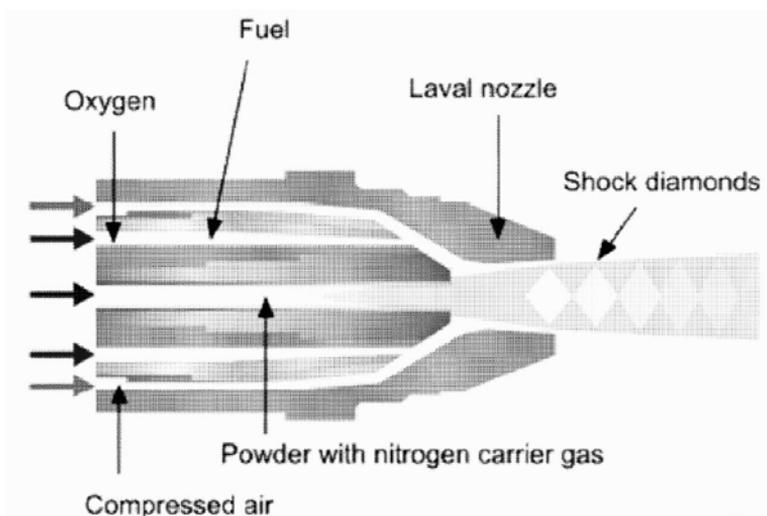


Рис. 3. Схема воздухоохлаждаемой горелки Diamond Jet компании Sulzer Metco [4]: Oxygen — кислород; Fuel — горючий газ; Laval nozzle — сопло Лавалья (сверхзвуковое сопло); Shock diamonds — волновая структура сверхзвуковой струи; Compressed air — сжатый воздух; Powder with nitrogen carrier gas — порошок в транспортирующем азоте

Горелки схемы DJ — единственные среди ВКТН-горелок, охлаждаемые воздухом. Воздух подается через кольцевой зазор между головкой и насадком в полость КС, формируя вдоль всей стенки ее и сопла пристеночную завесу, препятствующую контакту горячих продуктов сгорания с ними. Само сопло выполнено в виде короткого цилиндрического канала или сопла Лавалья. Хотя тепловые потери в таких горелках минимальны, время пребывания частиц в газовом потоке в них значительно меньше, чем у горелок с протяженными сопловыми каналами, соответственно, ниже и их энергетическая эффективность. В то же время они (при давлении в КС 0,2–0,4 МПа) имеют минимальный среди ВКТН-горелок расход топливных компонентов, не требуют громоздких систем водяного охлаждения, обладают благодаря простоте конструкции высокой надежностью и малым весом, что делает их наиболее подходящими для работы в качестве ручного инструмента на небольших предприятиях и для нанесения покрытий вне стационарных участков, а также для интенсивного механизированного напыления относительно легкоплавких материалов — цветных металлов, нержавеющей стали, никелевых сплавов, пластиков.

Вторая серия горелок компании Sulzer Metco выполнена по схеме Diamond Jet Hybrid (DJH), предложенной в патенте [17] и представляющей развитие схемы DJ присоединением к ней водоохлаждаемого насадка с протяженным коническим СЗРК (рис. 4). В горелке модели 2700DJH суммарная длина околосвуковой и сверхзвуковой (с полууглом раскрытия 2°) частей стандартного соплового канала составляет 62 мм при диаметрах критического и выходного сечений 7,16 мм и 10,92 мм, соответственно [18], а для нанесения покрытий из крупнозернистых порошков карбидов и суперсплавов компания предлагает работающую на водороде модель 3600DJM с каналами увеличенной длины [19].

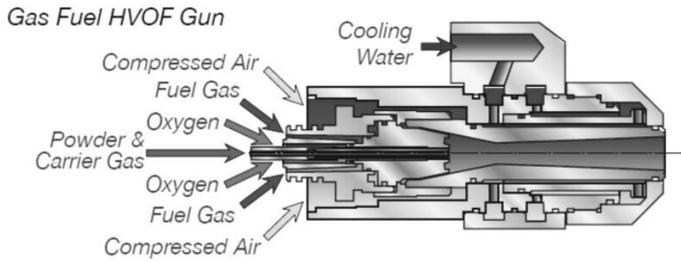


Рис. 4. Схема водоохлаждаемой горелки Diamond Jet Hybrid компании Sulzer Metco [20]: Compressed Air — сжатый воздух; Fuel Gas — горючий газ; Oxygen — кислород; Powder & Carrier Gas — порошок и транспортирующий газ; Cooling Water — охлаждающая вода

Благодаря малому объему КС и комбинированному охлаждению схема отличается минимальными потерями тепла в охлаждающую воду, по данным [9] в горелке 2700DJH они составляют 5–7% в зависимости от горючего газа и режима работы. Однако в протяженном сверхзвуковом канале в условиях резкой радиальной неоднородности параметров газовой фазы (в соответствии с расчетом [18] на входе в сопловой канал пристеночная зона с градиентом температур 300–2700 °С занимает более трети площади проходного сечения, в центральной зоне температура составляет 2700–3000 °С) и турбулизирующего воздействия дисперсной фазы происходит смешение продуктов сгорания с воздухом пристеночной завесы. Она накладывает ограничение на длину канала и приводит к снижению удельной энтальпии газового потока и его скорости в приосевой зоне горелки, и, соответственно, к уменьшению энергетической эффективности устройства. Технические характеристики популярных моделей горелок Diamond Jet обеих схем – 9ADJHE и 2700DJH – приведены в табл. 2

Наибольшее распространение в последние годы получила схема (рис. 5), по которой была выполнена выпущенная в 1992 г. первая промышленная жидкотопливная горелка JP5000 компании Hobart Tafa Technology, с 1999 г. принадлежащей корпорации Praxair. Эта схема (схема JP) ориентирована на максимальный разгон частиц при недопущении их нагрева до температуры плавления и основана на работе Дж. Браунинга [21]. В этой работе был обоснован метод получения покрытий из твердых частиц за счет их частичного плавления в процессе интенсивной пластической деформации при высокоскоростном соударении (Hypervelocity Impact Fusion).

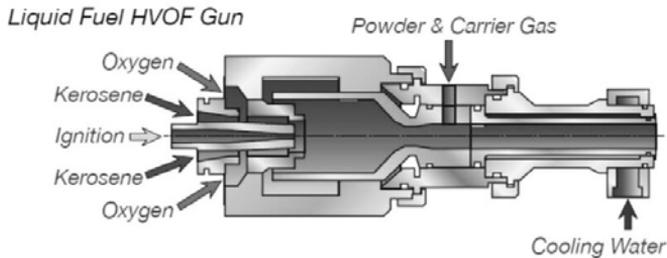


Рис. 5. Схема жидкотопливной горелки JP5000 компании Hobart Tafa/ Praxair [20]: Oxygen — кислород; Kerosene — керосин; Ignition — зажигание; Powder & Carrier Gas — порошок и транспортирующий газ; Cooling Water — охлаждающая вода

Во всех горелках этого типа применяются СЗРК с радиальной подачей порошка в сверхзвуковой поток, чем обеспечивается минимальное тепловое воздействие на частицы. Длина сверхзвукового канала достигает 305 мм, давление в КС — до 1,0 МПа, что позволяет достичь скорости частиц на уровне 1000 м/с [2]. Достоинством схемы является возможность напыления частицами, пребывающими в твердом состоянии, покрытий наивысшего качества и с соответствующей микроструктурой. Однако механизм формирования покрытий из твердых частиц более чувствителен к скоростной неоднородности частиц, возникающей вследствие разницы их размеров и столкновений между собой и со стенками устройства. Это проявляется в меньшем значении коэффициента использования порошка в таких горелках (44–60% по данным [22]) по сравнению в горелками ранее рассмотренных схем, в которых частицы достигают температуры плавления 50–70% [2]. Большой объем камеры сгорания, обусловленный применением жидкого горючего, высокое давление в ней, а также большая длина соплового канала приводят к тому, что тепловые потери в систему охлаждения составляют около трети всей тепловой мощности устройства [23], а в некоторых случаях достигают 50%, из которых до 20% приходятся на КС [4].

Дополнительным преимуществом этой схемы при применении цилиндрического СЗРК является возможность подачи порошка при минимальном давлении транспортирующего газа (или даже при нормальном давлении за счет эжекции) в зону за сверхзвуковым соплом, что упрощает конструкцию порошкового питателя и всей системы подачи порошка. Величина разрежения за счет перерасширения потока в сверхзвуковом сопле может составлять до — 0,03 МПа [23].

В настоящее время эта схема наиболее часто используется производителями ВКТН-горелок, которые стремятся защитить свои конструкции патентами. Примером может служить патент компании Sulzer Metco [24] на способ смешения и предварительного подогрева топливных компонентов и конструкцию головки с несколькими двухкомпонентными форсунками. Это техническое решение, примененное в моделях горелок серий WokaJet и WokaStar компании, позволило вдвое уменьшить длину КС и, соответственно, тепловые потери в ее стенку по сравнению с горелкой JP5220 (Praxair/Tafa), оснащенной одной центральной форсункой. На схеме JP построены также горелки Met-Jet 4L (Metallization, Великобритания), FX-5 (Flame Spray Technologies, Нидерланды), K2 (GTV GmbH, ФРГ) и нескольких менее известных фирм из различных стран. Технические характеристики некоторых из них приведены в табл. 2.

Пути повышения энергетической эффективности горелок для ВГПН

Во всех рассмотренных выше промышленных устройствах процессы нагрева и разгона частиц происходят одновременно при их движении в высокотемпературном высокоскоростном потоке в сопловом канале, что не позволяет в полной мере реализовать энергетический потенциал ВГПН, т. к. условия увеличения скорости и температуры частиц, как показано выше, являются взаимоисключающими. Поэтому во многих случаях не удается обеспечить необходимого для получения высококачественного покрытия сочетания скорости и теплового состояния частиц из тугоплавких материалов. Это противоречие решается применением горелок с функциональным разделением их газодинамических трактов на участок нагрева частиц в потоке газа, имеющим

высокую температуру и невысокую скорость, и участок разгона частиц в высокоскоростном потоке с соответственно меньшей температурой, которое впервые было предложено в работе авторов [25]. Известны две группы технических решений, реализующих такое разделение: первую составляют горелки с подачей дисперсной фазы непосредственно в камеру сгорания, где условия наиболее благоприятны для нагрева частиц, вторую — горелки с расходным управлением параметрами потоком, заключающимся в распределенной подаче компонентов топлива или продуктов сгорания в двух узлах подвода, между которыми и создается участок нагрева с соответствующими параметрами потока.

Попытки создать горелку для ВГПН с осевой подачей порошка в заднюю часть КС предпринимались неоднократно, и с использованием опытных конструкций были даже получены образцы покрытий высокого качества. Тем не менее, в ВКТН промышленного применения эта схема пока не нашла использования из-за низкой надежности, связанной с выносом частиц на стенки дозвуковой части сопла, имеющего диаметр критического сечения менее 10 мм, хотя она широко используется в горелках для ВВТН, имеющих, как правило, больший диаметр сопла. В последнее десятилетие лидерство на рынке ВВТН прочно утвердилось за основанной на патентах 1999 г. [26] и 2001 г. [27] технологией AC-HVAF (Activated Combustion High Velocity Air Fuel), оборудование для реализации которой выпускают американские компании UniqueCoat Technologies (горелки M2 и M3) и Kermetico (AK-07). Эти горелки имеют общую конструктивную схему (рис. 6), отличительным элементом которой является пористая или перфорированная керамическая перегородка, выполненная из материала, обладающего каталитическими свойствами для горения топливной смеси и установленная в переднем по потоку торце КС.

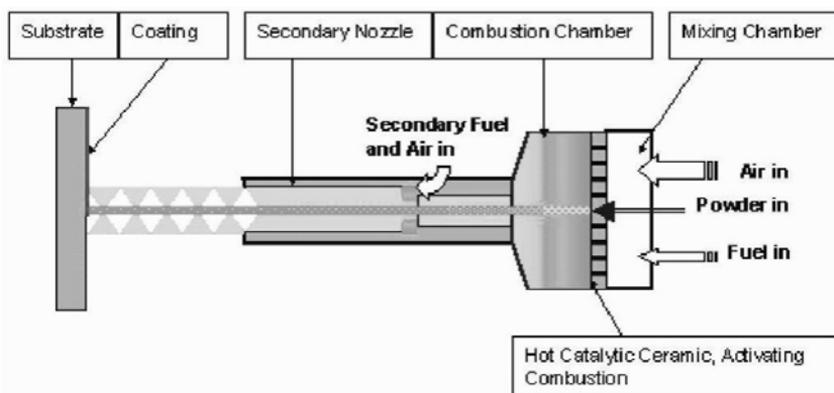


Рис. 6. Схема воздушнотопливной горелки для напыления методом AC-HVAF [28]: Substrate — подложка; Coating — покрытие; Secondary Nozzle — вторичное сопло; Combustion Chamber — камера сгорания; Mixing Chamber — камера смешения, Hot Catalytic Ceramic, Activating Combustion — горячая каталитическая керамическая перегородка; Air in — вход воздуха; Powder in — вход порошка; Fuel in — вход горючего; Secondary Fuel and Air in — вход дополнительных горючего и воздуха

Через эту перегородку в КС подается смесь горючего газа с предварительно нагретым в каналах охлаждения воздухом, каталитическое горение которой начинается еще в порах или каналах перегородки и завершается в прилегающей к ней области КС. Таким образом, в камеру сгорания поступает, по

сути, горячий газ, равномерно распределенный по всему ее сечению. Благодаря начальной однородности параметров потока в КС течение в горелке имеет ламинарный характер, что позволяет производить осевую подачу порошка непосредственно в короткую (менее 5 см) КС без опасности его попадания на стенку сопла за счет сохранения на значительно большей дистанции, чем в горелках других типов; при диаметре канала подачи порошка 3 мм пятно напыления имеет диаметр около 6 мм [7].

Горелки, как правило, имеют дозвуковые цилиндрические сопловые каналы, разгоняющие частицы до скоростей порядка 700–800 м/с. В соответствии с патентом [26] могут применяться и “каскадные” каналы с дополнительной подачей горючей смеси (на рис. 6 показан именно такой вариант горелки), позволяющей увеличить длину канала за счет повышения расхода газа (соответственно и тепловой мощности) без изменения давления конструкции КС в КС и пористой вставки. Это позволило в горелке МЗ повысить максимальную скорость частиц до 1200 м/с. В зависимости от дисперсности напыляемого порошка и его теплофизических свойств метод АС-HVAF обеспечивает нанесение покрытий из расплавленных или твердых частиц исключительно высокого качества [28]. Благодаря сочетанию малого объема КС, протяженного соплового канала, воздушного охлаждения и подаче порошка в КС горелки этой схемы имеют максимальную среди промышленных ВГПН горелок тепловую эффективность. Технические характеристики горелки МЗ приведены в табл. 2.

Другим примером горелки с осевой подачей порошка в КС является созданная в Университете им Н. Манделы (ЮАР) жидкотопливная ВВТН-горелка, подробная конструктивная схема которой показана на рис. 7. Стабилизация потока частиц в КС в ней достигается созданием коаксиального ему потока продуктов сгорания дополнительной горючей смеси, подаваемой через канал охлаждения трубки подачи порошка. Это позволило отнести место подачи порошка вглубь КС на 70 мм от входного сечения дозвукового участка сопла и повысить тепловую эффективность процесса ВВТН до возможности нанесения им твердого сплава на основе карбида вольфрама [29].

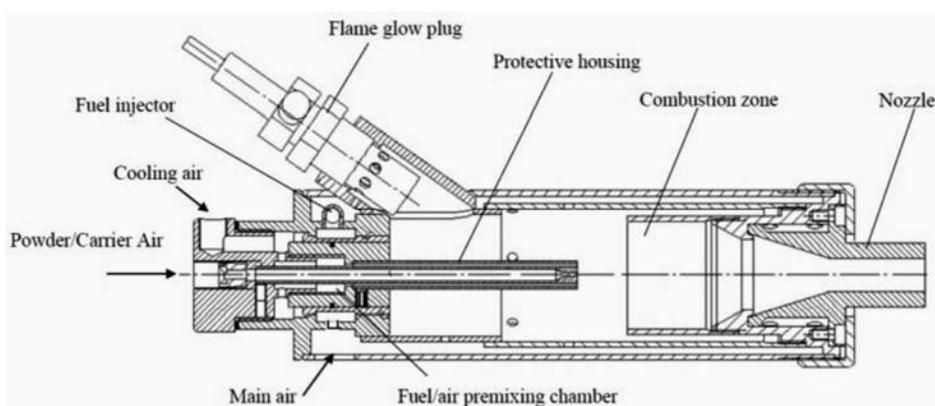


Рис. 7. Схема жидкотопливной ВВТН-горелки Университета им Н. Манделы (ЮАР) [29]: Powder/Carrier Air — порошок, транспортирующий газ; Fuel injector — топливная форсунка; Cooling air — охлаждающий воздух; Main air — основной воздух; Flame glow plug — свеча зажигания; Fuel/Air premixing chamber — камера смешения; Protective housing — защитный кожух; Combustion zone — зона горения; Nozzle — сопло

Принцип функционального разделения участков нагрева и разгона путем расходного воздействия на поток был предложен в конце 1980-х годов в авторских свидетельствах СССР [30, 31] и детально обоснован в работах [10, 32]. В первых авторских свидетельствах было предложено создавать высокотемпературный высокоскоростной поток продуктов сгорания кислород-водородной смеси в три стадии, на первой из которых проводить сжигание очень “богатой” смеси (коэффициент избытка окислителя $0,3 \div 0,5$); а на второй — проводить дожигание избыточного горючего при движении продуктов сгорания в протяженном цилиндрическом канале, подавая в него через распределенные по его длине пояса отверстий дополнительный окислитель и доводя в конце канала значение соотношения компонентов до стехиометрического. При этом за счет совместного теплового и расходного воздействия происходит постепенное ускорение потока до скорости звука, достигаемой в конце этого канала. Порошок вводят в поток аксиально в начале тракта. Схема позволяет проводить нагрев частиц в восстановительной среде при меньшей скорости потока на большей части дозвукового канала, чем в традиционном ДЗРК. На третьей стадии в СЗРК производят разгон нагретых частиц в сверхзвуковом потоке. Недостатками такой схемы являются относительно низкая температура газа в первой половине канала.

Этих недостатков лишена схема, в которой газодинамический тракт горелки состоит из двух последовательно установленных камер сгорания (схема Д, рис. 1). Впервые эта схема была предложена в патенте 1990 г. [33], где вторая по потоку КС, в которой происходит сжигание горючего газа при повышенном давлении, играет роль эжектора для создания потоком продуктов сгорания из нее разряжения в первой КС с целью применения в ней ацетилена в качестве горючего. В патенте не ставилась задача организации специального участка нагрева порошка, поэтому канал между КС имеет минимальную длину, конструктивно необходимую для их разделения. Эта конструкция не получила промышленного применения из-за очевидной нецелесообразности использования ацетилена в качестве горючего в системах ВГПН. Дальнейшее развитие схема двухкамерной горелки получила в патенте [26], в котором применительно к ВВТН предусматривается наличие между камерами сгорания протяженного цилиндрического канала, увеличивающего общую длину тракта. При этом параметры потока в нем соответствуют параметрам в традиционном ДЗРК, так как авторы не предусматривали в нем обеспечение наиболее благоприятных условий нагрева дисперсной фазы при соотношениях диаметров межкамерного канала и выходного ДЗРК и расходов горючей смеси между КС.

Реализация принципа расходного управления параметрами двухфазного потока для функционального выделения участков нагрева и разгона частиц была впервые осуществлена в работающих на горючих газах двухкамерных горелках “Град-В” и “Град-К” ИПМ НАН Украины, первая из которых предназначена для ВВТН и имеет регенеративное воздушное охлаждение, вторая (водоохлаждаемая) — для ВКТН [34]. Качество полученных с использованием этих горелок покрытий из композиционных порошков подтверждает их высокую энергетическую эффективность [35]. Еще одним преимуществом этой схемы является возможность регулирования параметров и химического состава потока на различных участках тракта применением в камерах сгорания различных горючих и даже топливных пар.

Схема жидкотопливной горелки для ВГПН с расходным управлением параметрами потока была предложена в патенте [36] и реализована в экспериментальной горелке ГВО-РВ. Ее конструктивная схема (рис. 8) отличается от

кольцевой КС большого объема с расположенным на ее оси каналом нагрева, в начале и конце которого установлены узлы подвода в него газа продуктов сгорания, обеспечивающие течение двухфазного потока в нем подобно течению в межкамерном канале двухкамерной горелки.

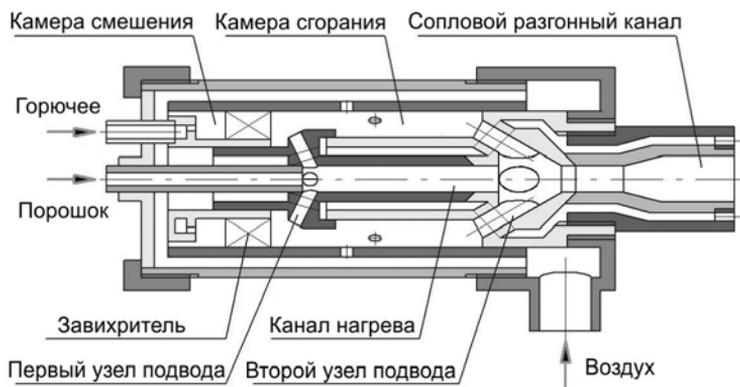


Рис. 8. Схема жидкотопливной ВВТН-горелки ГВО-РВ

Из-за большой поверхности теплообмена теплопотери в стенку в этой схеме максимальны, однако, за счет высокой эффективности нагрева дисперсной фазы ее общая энергетическая эффективность превосходит традиционные схемы сопловых каналов. Кроме того, она позволяет совместить преимущества функционального разделения процессов нагрева и разгона дисперсной фазы с преимуществами повышения давления в КС, обеспечиваемыми применением жидкого горючего.

Выводы

Энергетическая эффективность горелок для ВГПН является одним из основных критериев их оптимизации. Конкурентность процессов нагрева и разгона частиц напыляемого материала газовым потоком препятствует их одновременной интенсификации и требует их проведения раздельно в две стадии, на первой из которых производится нагрев частиц дозвуковым потоком, а на второй — их ускорение сверхзвуковым. В существующих промышленных ВГПН-горелках это может быть достигнуто (без существенного изменения их конструкции) с использованием комбинированных сопловых каналов, позволяющих варьированием длины до- и сверхзвукового участка для регулирования параметров дисперсной фазы в диапазоне значений, достигаемых в дозвуковых и сверхзвуковых сопловых каналах. Максимальной энергетической эффективностью среди существующих ВГПН-горелок обладают горелки с функционально выделенным участком нагрева частиц в потоке, имеющим параметры близкие к параметрам в камере сгорания горелки. Такие горелки обеспечивают не только максимально возможную для заданных условий в КС энтальпию частиц, но и максимальную их скорость. Функциональное разделение участков нагрева и разгона частиц обеспечивается либо аксиальной подачей порошка непосредственно в КС, либо в специально организуемых с использованием технологии расходного управления параметрами потока канал нагрева. В настоящее время этот подход превалирует в промышленном ис-

пользовании технологии ВВТН и является перспективным для технологии ВКТН.

Проведен анализ влияния схемных и конструктивных особенностей горелок для высокоскоростного газопламенного напыления на их энергетическую эффективность. Показано, что конфигурация соплового канала горелки является основным фактором, определяющим эффективность межфазового энергообмена в ней. Приведены результаты расчетного сравнения эффективности нагрева и разгона частиц в каналах различной конфигурации. Рассмотрены конструкции основных промышленных горелок для высокоскоростного кислородно-топливного и воздушно-топливного напыления; на примере экспериментальных горелок показана перспективность схем горелок с функциональным разделением участков нагрева и разгона частиц порошка.

Ключевые слова: высокоскоростное газопламенное напыление, горелки для высокоскоростного кислородно-топливного и воздушно-топливного напыления, энергетическая эффективность, горелки с функциональным разделением участков нагрева и разгона порошка.

The effect of schematic and design features of burners for high-velocity gas-flame spraying on their energy efficiency is analyzed. It is shown that the configuration of the burner nozzle channel is the main factor determining the effectiveness of interphase energy exchange in it. The results of the calculated comparison efficiency of heating and particle acceleration in channels of various configurations are presented. The basic design of industrial burners for high oxy-fuel and air-fuel spraying are considered. Perspective of burners schemes with a functional separation of powder particles heating and acceleration sections is shown.

Keywords: high velocity flame spraying, high velocity oxy/air fuel burners, energy efficiency, burners with functional separation powder heating and accelerating path sections.

1. Газотермическое напыление: учеб. пособие / под ред. Л. Х. Балдаева. – М.: Маркет ДС, 2007. – 344 с.
2. Handbook of thermal spray technology / Edited by J. R. Davis. – ASM International, Materials Park, OH, 2004. – 338 p.
3. Коробов Ю. С. Международная конференция-выставка по термическому напылению ITSC-2010: обзор и анализ // Термическое напыление: современное состояние. Материалы международного научно-практического семинара (28–29 сентября 2010 г.) – ФГАОУ ВПО УрФУ. Екатеринбург, 2010. – С. 4–26.
4. Schneider K. E. Thermal Spraying for Power Generation Components / K. E. Schneider, V. Belashchenko, M. Dratwinski et al. – WILEY-VCH Verlag GmbH & Co, Weinheim, 2006. – 271 p.
5. Hamatani H. Mechanical and thermal properties of HVOF sprayed Ni based alloys with carbide / H. Hamatani, Y. Ichiyama, J. Kobayashi // Science and technology of advanced materials. – 2002. – Vol. 3, No. 4. – P. 319–326.
6. Кисель В. М. Современное состояние и развитие технологии высокоскоростного воздушно-топливного напыления / В. М. Кисель, Ю. И. Евдокименко // Вісник українського матеріалознавчого товариства. – К. – 2010, Вип. 3. – С. 65–79.

7. *Барановский В.* HVOF-оборудование сверхзвукового газозвукового напыления / В. Барановский // Термическое напыление: современное состояние. Материалы международного научно-практического семинара (28–29 сентября 2010 г.) – ФГАОУ ВПО УрФУ, Екатеринбург, 2010. – С. 73–97.
8. *Пат. 2861900 США.* Cl. 117-105. Jet plating of high melting point materials / G. H. Smith., R. C. Eschenbach, J. F. Pelton, заявитель: Union Carbide Corporation. – № 505228; – заявл.: 2.05.1955; опубл.: 25.10.1958. – 6 с.
9. *Rusch W.* Comparison of Operating Characteristics for Gas and Liquid Fuel HVOF Torches // Thermal Spray 2007: Global Coating Solutions. Edited by B. R. Marple, M. M. Hyland et al. – ASM International, Materials Park, OH. – 2007. – P. 572–576.
10. *Пат. 57147 Украина.* МПК7 В 05 В 7/20. Спосіб газотермічного напіння порошковіх матеріалів / Ю. І. Євдокименко, В. М. Кисіль, В. Х. Кади́ров та інші; заявитель и патентообладатель Інститут проблем матеріалознавства НАН України. – № 2000127585; заявл.: 27.12.2000; опубл.: 16.06.2003. – Бюл. № 6. – 4 с.
11. *Евдокименко Ю. И.* Энергетическая эффективность горелок для высокоскоростного газопламенного напыления / Ю. И. Евдокименко, В. М. Кисель, Г. А. Фролов // Авиационно-космическая техника и технология. – 2011. – № 7 (84). – С. 12–18.
12. *Пат. 4416421 США.* МПК3 В 05 В 7/20. Highly concentrated supersonic liquefied material spray method and apparatus / J. Browning; заявитель: Browning Engineering Corporation. – № 287652; заявл.: 28.07.1981; опубл.: 22.11.1983. – 9 с.
13. *Пат. 5120582 США.* МПК5 В 05 D 1/08. Maximum combustion energy conversion air fuel internal burner / J. A. Browning; заявитель: Browning Engineering. – № 641958; заявл. 16.01.1991; опубл.: 09.01.1992. – 6 с.
14. *Ivosevic M.* Splat Formation during Thermal Spraying of Polymer Particles: Mathematical Modeling and Experimental Analysis / M.A Ivosevic // Thesis for the degree of Doctor of Philosophy. – Drexel University. – Philadelphia, Pennsylvania, USA. – July 2006. – 257 p.
15. *HVOF Peripherals* [Электронный ресурс]: каталог / Официальный сайт компании Deloro Stellite.
<http://stellite.com/ProductsServices/Equipment/HVOFPeripherals/tabid/349/Default.aspx>.
16. *Пат. 4865252 США.* МПК4 В 05 В 1/24. High velocity powder thermal spray gun and method / A. J. Rotolico, L. A. Sala et al.; заявитель: Perkin-Elmer Corporation. – № 193030; заявл.: 11.05.1988; опубл.: 12.09.1989. – 10 с.
17. *Пат. 5148986 США.* МПК5 В 05 В 1/24. High pressure thermal spray gun / W. P. Rusch; заявитель: Perkin-Elmer Corporation. – № 732978; заявл.: 19.07.1991; опубл.: 22.09.1992. 7 с.
18. *Li M.* Modeling and Control of High-Velocity Oxygen-Fuel (HVOF) Thermal Spray: A Tutorial Review / M. Li, P. D. Christofides // J. Thermal Spray Techn. – 2009. – Vol. 18, No. 5–6. – P. 753–768.
19. *Diamond Jet Gas-Fuel HVOF Spray Guns* [Электронный ресурс]: Product Data Sheet /– Sulzer Metco. – 2009, Iss. 2. – Режим доступа: http://www.sulzermetco.com/en/portaldata/13/Resources//DOCUMENTS2/DSE/DSE_DJGun_EN2.pdf. – 4 с.
20. *Sulzer Metco High Velocity Oxy-Fuel (HVOF) Solutions* [Электронный ресурс]: каталог / Sulzer Metco. – 2011, Iss. 4. – Режим доступа: http://www.sulzermetco.com/en/portaldata/13/Resources//documents2/Brochures/HVOFSolutions_EN4.pdf. – 16 с.
21. *Browning J. A.* Hypervelocity Impact Fusion – A Technical Note / J. A. Browning // J. Therm. Spray Techn. – 1992. – Vol. 1, No. 4. – P. 289–292.
22. *HVOF MetJet 4L* [Электронный ресурс]: буклет / Официальный сайт компании Metallization. – Режим доступа: <http://www.metallisation.com/product/metjet4lhvof.html>
23. *HP/HVOF Equipment Solution* [Электронный ресурс]: Brochure / Официальный сайт компании Praxair Surface Technologies, Inc.

24. *Пат. 2006/0166153 AI США*. МПК7 F 23 D 11/44. High velocity oxygene fuel (HVOF) liquid fuel gun and burner design / W. P. Rusch, M. Spaulding, M. Hacker; заявитель: Sulzer Metco (US) Inc. – No. 11/314530; заявл.: 22.12.2005; опубл.: 27.07.2006. – 7 с.
25. *Kadyrov E.* Interaction of Particles with Carrier Gas in HVOF Spraying System / E. Kadyrov, Y. Evdokimenko, V. Kysil, V. Kadyrov // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 1994. – Vol. 3(4). – P. 389–397.
26. *Пат. 5932293 США*. МПК6 В 05 D 1/08, В 23 К 9/00. Thermal spray systems / V. E. Belashchenko, V. E. Baranovski, заявитель: Metalspray U.S.A., Inc. – № 08/624262, заявл.: 29.03.1996; опубл.: 29.03.1999. – 22 с.
27. *Пат. 6245390 США*. МПК7 С 23 С 4/12, В 05 В 1/24. High-velocity thermal spray apparatus and method of forming materials / V. Baranovski, A. Verstak. № 09/393575; заявл.: 10.09.1999; опубл.: 06.12.2001. – 9 с.
28. *Verstak A.* AC-HVAF sprayed Tungsten Carbide: Properties and Applications / A. Verstak, V. Baranovski // *Thermal Spray 2006: Science, Innovation, and Application (ASM International)*. – 2006. – P. 643–648.
29. *Gorlach I. A.* Low Cost HVAF for Thermal Spraying of WC–Co / I. A. Gorlach // *Expanding Thermal Spray Performance to New Markets and Applications*. Edited by Basil R. Marple, Margaret M. Hyland et al. Proceedings of the 2009 ITSC. May 4–7, 2009. Las Vegas, Nevada, USA – P. 718–722.
30. *А. с. № 1610913 СССР*. МПК5 С 23 С 4/00. Способ нанесения тугоплавких покрытий / В. М. Кисель, А. В. Чоба, Г. Г. Карюк и др. – № 4465842/31–02; заявл. 26.07.88. ДСП. – с. 2.
31. *А. с. № 1554986 СССР*. МПК5 В 05 В 7/20. Сверхзвуковая горелка для газопламенного напыления покрытий / Ю. И. Евдокименко, В. М. Кисель и др. – № 4310674/31–05; заявл. 28.09.1987; опубл. 07.04.1990. – Бюл. № 13.
32. *Евдокименко Ю. И.* Исследование газодинамических трактов генераторов двухфазных потоков с расходным управлением их параметрами / Ю. И. Евдокименко Ю. И., В. М. Кисель, В. И. Тимошенко // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2003. – Вип. 6 (41). С. 69–3.
33. *Пат. DE 90 4016412 ФРГ*. МПК5 С 23 С 4/12, В 05 В 7/20. Verfahren und Vorrichtung zum Hochgeschwindigkeitsflammspritzen von hochschmelzenden draht- und pulverförmigen Zusatzwerkstoffen zum Beschichten von Oberflächen / E. D. Huhne. – Дата приоритета: 08.05.90.
34. *Евдокименко Ю. И.* Высокоскоростное газопламенное напыление двухкамерными горелочными устройствами / Ю. И. Евдокименко, В. М. Кисель, В. Х. Кадыров // *Порошковая металлургия*. – № 11/12. – 2003. С. 45–54.
35. *Евдокименко Ю. И.* Свойства покрытий из интерметаллидных соединений Ni–Al, нанесенных методом высокоскоростного воздушно-топливного напыления / Ю. И. Евдокименко, В. М. Кисель, С. В. Бучаков // *Порошковая металлургия*. – 2010. – № 11/12. – С. 54–62.
36. *Пат. 55558 Украина*. МПК7 В 05 В 7/20. Пристрій для газотермічного напылення порошкових матеріалів / Евдокименко Ю. І., Кисель В. М., Кадыров В. Х.; заявитель и патентообладатель Институт проблем материаловедения НАН Украины. – № 2001031651; заявл. 12.03.2001; опубл. 15.04.2003. – Бюл. № 4. – 6 с.