
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ КУМУЛЯТИВНО-ДЕТОНАЦИОННОГО И HVOF УСТРОЙСТВ ДЛЯ ГАЗОТЕРМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ ПОКРЫТИЙ

Ю.Н. Тюрин*, А.Д. Погребняк**, О.В. Колисниченко*

*Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины (Киев)

Украина

**Сумской институт модификации поверхности

Украина

Поступила в редакцию 03.04.2009

Проведен сравнительный анализ эффективности кумулятивно-детонационного устройства для газотермического напыления покрытий с серийно выпускаемыми HVOF установками. Отличительной особенностью кумулятивно-детонационного устройства является наличие двух камер, где происходит сгорание горючих смесей с частотой 10 – 30 Гц. Простоте в обслуживании технологическое оборудование обеспечивает низкую стоимость и высокую эффективность процесса напыления и экономное использование материально-энергетических ресурсов.

ВВЕДЕНИЕ

Преимуществами высокоскоростного газопламенного метода HVOF по сравнению с другими методами газотермического напыления являются достаточно высокая скорость частиц (до 750 м/с) и минимальная пористость получаемого покрытия (1 – 4%). На практике широко используются такие выпускаемые серийно устройства HVOF как, JP-5000/8000 (Tafa-Praxair, USA), DJ 2600/2700 (Sulzer Metco, USA), Intelli-Jet (Solid Spray Technologies, USA), HV 50 HVOF (Flame Spray Technologies, the Netherlands) и другие. Как пример удачного совершенствования устройства HVOF можно привести горелку TOPGUN®AIRJET [1], которая может распылять порошки и проволоки. Национальный институт металлов (NIMS) в Японии разработал насадку на устройство для HVOF [2], которая снижает температуру рабочего газа. В эту насадку дополнительно подают до 30 м³/час азота. Наиболее интересна горелка HVAF-Intelli-Jet, которая представлена Joint Stock Company “Mashprom” (Екатеринбург, Россия) [3]. Эта горелка использует более 300 м³/час воздуха и до 16 м³/час пропилена. Охлаждение горелки осуществляется компонентами горючей смеси, что повышает ее экономичность.

К недостаткам известных устройств и технологий HVOF относится то, что они энергоемки и используют газы под давлением 4 МПа. Это усложняет системы управления

газами, повышает требования к безопасности и снижает эффективность газобаллонных систем. Анализ расходов энергии и газов в устройствах для газотермического нанесения покрытий показывает (табл. 1), что HVOF технология на каждый килограмм покрытия затрачивает более 10 м³ компонентов горючей газовой смеси. Это необходимо для создания в камере сгорания высокого давления и, как следствие, формирование в сопле устройства для HVOF высокоскоростной струи газа. Но, этот газ имеет избыточную тепловую мощность, которая отрицательно влияет на процесс формирования покрытия, снижает эффективность напыления и увеличивает загрязнение атмосферы. Кроме того, высокая плотность энергии в сопле устройства сильно ограничивает его работоспособность, до 5 – 10 часов. Борьба за увеличение работоспособности сопел и всего устройства усложняет и делает более энергозатратными системы охлаждения. Анализ стоимости покрытия, при использовании HVOF установок показал, что текущие материально-энергетические затраты на напыление установками HVOF соизмеримы со стоимостью порошка и составляют 80 – 110 долларов на напыление одного килограмма покрытия [4]. При расчете учитывалась стоимость компонентов горючей смеси, инертного газа, воздуха, электрической энергии и отчисления за стоимость оборудования. В табл. 1 приведено сравнение основных параметров разработанного нами

Таблица 1
Основные параметры устройств при
напылении металлокерамических покрытий

Параметры напыления	Единица измерения	Название устройств для высокоскоростного газопламенного напыления (HVOF)			CDS
		Jet-DJ9W [4]	JP500 [4]	DZ900E [5]	
Азот	м ³ /час	0,8	0,8	–	–
Кислород	м ³ /час	1,8	60	20	3,5
Воздух	м ³ /час	–	–	2	2,3
Пропан	м ³ /час	–	–	5,4	0,7
Метан	м ³ /час	12	–	–	–
Керосин	л/час	–	19	–	–
Пропилен	м ³ /час	–	–	–	–
Электричество	кВт	7*	10*	28**	3**
Сопло устройства	шт/час	0,12	0,12	0,1	0,001
Ким	%	55 - 70	40 - 60	60 - 70	80
Производительность	кг/час	3,2	3	3	1
Дистанция напыления	мм	250 - 300	300 - 400	150 - 200	30 - 80

* Затраты электроэнергии включают затраты на работу компрессора, осушителя воздуха и пульта управления.

** Затраты электроэнергии включают затраты на работу компрессора, пульта управления и системы охлаждения

кумулятивно-детонационного устройства (CDS) и нескольких серийно выпускаемых устройств HVOF.

Практически все устройства HVOF расходуют 30 – 50 кВт электрической энергии на работу системы охлаждения. Высокая эффективность покрытия окупает затраты на материалы и электрическую энергию, но проблема выбросов в атмосферу парниковых газов и аэрозолей остается. Известные технологии напыления покрытий сопровождаются большими выбросами парниковых газов и аэрозолей, что усложняет и удорожает устройства для их нейтрализации.

Известно, что для формирования качественных покрытий необходимо не допускать перегрева наносимого материала и обеспечить его кинетической энергией, необходимой для пластического деформирования, а также создания высокой адгезионной и когезионной прочности. В устройствах HVOF большая тепловая мощность газа обусловлена необходимостью повышения его давления в камере и обеспечения высокоскоростного ис-

течения через сопло, имеющее небольшое сечение.

В настоящее время достаточно активно развивается направление Cold Spraying – технологии напыления покрытий из пластичных материалов с использованием высокоскоростной струи инертного газа или воздуха. Для повышения эффективности технологии газ нагревают. Несмотря на высокую энергоемкость, затраты только на нагрев газа составляют – 10 ÷ 35 кВт [6], эта технология эффективна для специального применения и постоянно совершенствуется [7 – 9]. Системы для холодного нанесения покрытий обеспечивают высокоскоростную струю газа за счет его сжатия под высоким давлением – 1 ÷ 3 МПа и истечения из сопла ограниченного диаметра.

Альтернативой технологиям Cold Spraying и HVOF служат импульсные, например детонационные системы, которые обеспечивают формирование высокоскоростной струи газа, имеющего достаточно низкую тепловую мощность. В импульсных системах высокая мощность струи газа имеет преимущественно кинетическую составляющую. В этих струях порошки приобретают большую кинетическую энергию без перегрева. Это обеспечивает формирование ламельной структуры покрытия на твердой подложке. Низкая тепловая мощность, высокая скорость газа и порошкового материала позволяет не перегреваться соплу, что увеличивает его работоспособность на несколько порядков.

Проведенный анализ показывает, что для газотермического нанесения покрытий наиболее эффективно использовать технологии, где осуществляется детонационное сгорание горючих смесей. В данном случае большая часть энергии затрачивается на ускорение продуктов сгорания, что обеспечивает их высокую скорость с минимальным нагревом. Известны детонационные устройства различной конфигурации. Например, Aerostar Coatings использует высокочастотные устройства NHDS [10]. В России ОАО “Нии-Химмаш” (г. Новосибирск) производит и активно продвигает на рынок устройства типа “Гром”. На Украине широко используют установки типа “Pegun”. Эти устройства ис-

пользуют для нанесения покрытий из твердого сплава, металлокерамики и пр. К недостаткам детонационной технологии, можно отнести небольшую производительность и ограничения по использованию компонентов горючей смеси. В детонационной технологии используют смеси близкие к стехиометрии. Это не позволяет формировать низкотемпературные газовые струи. Кроме того, имеются ограничения по созданию струи с восстановительным составом продуктов сгорания. Разработаны устройства, где продуктам детонационного сгорания горючих газовых смесей придают дополнительную кинетическую и тепловую энергию, используя мощный преобразователь электрической энергии (до 20 кВт), который подключался к специальному электроду в детонационной камере [11].

Мы предлагаем новую конструкцию энергосберегающего кумулятивно – детонационного устройства для нанесения покрытий [12], которое обеспечивает формирование качественного покрытия при меньших затратах электроэнергии и компонентов горючей газовой смеси (см. табл. 1).

ОПИСАНИЕ УСТРОЙСТВА CDS

В кумулятивно-детонационном устройстве реализован режим детонационного сгорания горючих смесей.

Устройство состоит (рис. 1) из детонационной камеры – 1, где реализуется детонационный режим сгорания горючей газовой смеси. Кроме того, устройство содержит кумулятивно-детонационную камеру – 2, работающую с использованием горючих смесей любой концентрации, что позволяет формировать высокоскоростную струю газа с избытком азота, углерода и т.д. Цилиндрическое сопло – 3 предназначено для нагрева и ускорения порошковых материалов. Оно изготавливается из медных трубок и может иметь любую конфигурацию сечения и выходной диаметр от 10 до 30 мм. Кроме того, CDS имеет узел – 4 для ввода и газовой отсечки газопорошковой смеси, автомобильную свечу зажигания – 5 для инициирования детонационного режима сгорания, и систему трубопроводов – 6 для ввода компонентов горючей газовой смеси.

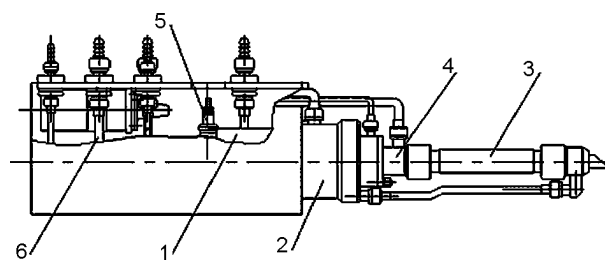


Рис. 1. Вид кумулятивно-детонационного устройства для нанесения покрытий

Существенным отличием работы кумулятивно-детонационного устройства от детонационного является то, что в нем осуществляется суммирование энергии продуктов детонационного сгорания горючих газовых смесей от нескольких специально профилированных детонационных камер. Кумуляция энергии позволяет сформировать высокоскоростной поток рабочего газа, имеющий несколько ударных волн, что обеспечивает эффективное взаимодействие их с порошковым материалом. Это обеспечивает рациональное использование энергии горючей газовой смеси. Скорость и температура продуктов сгорания зависят только от режима сгорания в каждой из камер.

Экспериментальные работы показали, что сопла кумулятивно-детонационного устройства имеют работоспособность более 1000 часов. Высокая частота инициирования сгорания (15 – 30 Гц) в CDS обеспечивает возможность осуществления квазинепрерывной технологии нанесения покрытий, что позволяет использовать стандартные устройства для подачи порошков и газов. Низкая тепловая мощность продуктов сгорания делает возможным формирования покрытия с небольшой дистанции (10 – 60 мм), что существенно повышает эффективность напыления, снижает окисление и потери напыляемого материала. Имеется возможность нанесения покрытий на изделия маленького размера и с тонкими стенкам (0,3 – 1,0 мм), что увеличивает область применения технологии. Технология импульсная, продукты сгорания и порошок имеют контакт со стенками устройства 1 – 2 – 10^{-3} сек, что снижает тепловую напряженность стенок и, соответственно, затраты на их охлаждение. Кроме того, использование исходных газов низкого давления 0,1 – 0,2 МПа позволяет комплектовать пулты уп-

равления соответствующими дешевыми устройствами, что снижает их стоимость и, самое главное, повышает безопасность ведения работ. Использование технологических газов низкого давления существенно повышает эффективность использования газобаллонных систем.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Для оценки диапазона фракций порошка усваиваемых при нанесении покрытий с использованием CDS был взят порошок: ПС-12НВК-01 (Ni-основа; Cr – 14 – 20%; В – 3,5%; Si – 4,3%; Fe < 7%; С – 0,8%, WC – 35%). Фракция порошка: 40 мкм – 50%; 40 – 63 мкм – 15%; 63 – 80 – 7%; +80 мкм – 28%.

Использование механической смеси с большим разбросом по сечению фракций позволяет оценить возможность нагрева и ускорения порошков различных фракций. Расстояние от среза сопла CDS до поверхности образца – 50 мм, скорость перемещения образца 13 мм/сек. Покрытие наносилось послойно за пять проходов, толщина слоя за один проход составляла 30 мкм. В качестве материала подложки использовали медь М1.

Расход газов при нанесении покрытия составлял – $G_{\text{CЗН8}} = 0,47 \text{ м}^3/\text{ч}$; $G_{\text{O}_2} = 2,6 \text{ м}^3/\text{ч}$; $G_{\text{возд.}} = 3,13 \text{ м}^3/\text{ч}$. Порошковый питатель обеспечивал при нанесении покрытий расход порошка 1,0 кг/час. Частота следования импульсов – $S = 12 \text{ Hz}$. В качестве транспортирующего газа использовался воздух.

На рис. 2, 3 приведен поперечный вид покрытия из ПС-12НВК-01. При анализе покрытий на сканирующем микроскопе наблюдается перемешивание материала покрытия и подложки в слое, размер которого превосходит в 3 раза фракцию напыляемого порошка. В переходной зоне наблюдается до 52% меди (табл. 2) [13].

Часть порошкового материала глубоко (до 100 мкм) проникла и прочно соединена с материалом подложки, см. рис. 2. По-видимому, скорость дискретных частиц порошка так высока, что при столкновении с подложкой образуются напряжения превосходящие

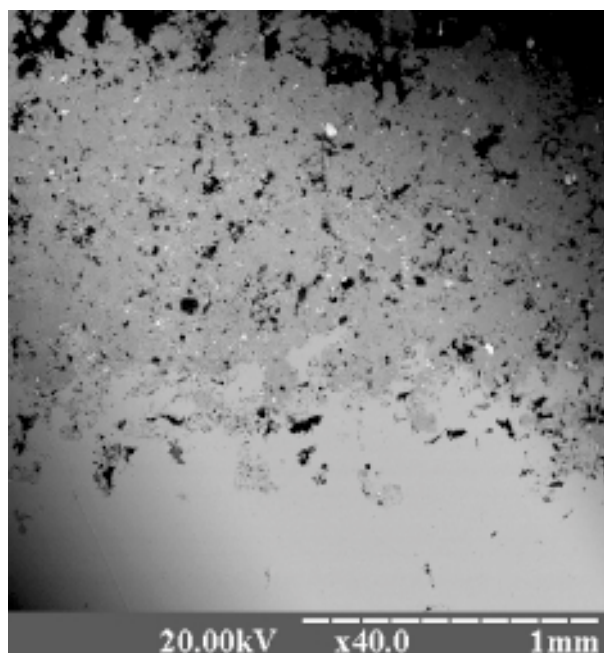


Рис. 2. Вид косо́го шлифа (7°) покрытия из порошка ПС-2НВК-01 на медной подложке.

предел прочности материала подложки. Наблюдается также перемешивание материалов покрытия и подложки. В покрытии видны твердые включения, характерные для карбидов вольфрама. Основная масса порошка материала покрытия деформирована и плотно упакована, но имеются включения в виде холодных, недеформированных порошинок, большого сечения $> 50 \text{ мкм}$, рис. 3. Пористость покрытия обусловлена наличием недеформированных частиц, которые при подготовке шлифа выкрашивались.

Экспериментальные исследования показали, что коэффициент использования материала, при нанесении покрытий из порошка ПС-12НВК-01, составляет только 50%. Боль-

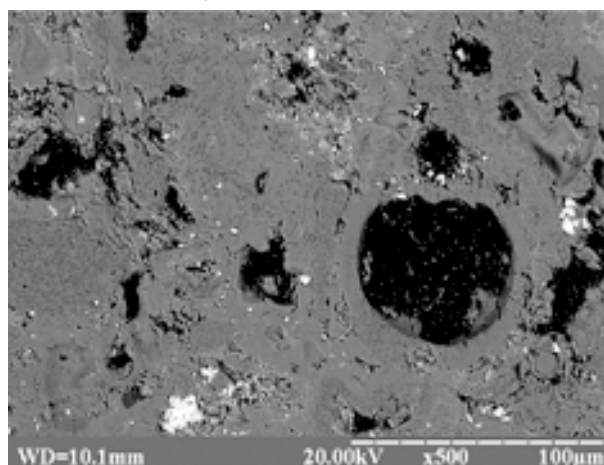


Рис. 3. Сечение покрытия ПС-12НВК-01 с видом на отпечаток выкрошенной частицы порошка.

шая часть порошка не успевает прогреться в сопле CDS и отражается от твердой поверхности покрытия. Некоторые частицы порошка, деформируя поверхность, внедряются в слой покрытия, но не образуют компактного материала. Частицы материала, имеющего размер ниже 40 мкм, прогреваются и при формировании покрытия деформируются, образуя плотный материал с включениями карбидов вольфрама.

Таблица 2

Распределение химических элементов

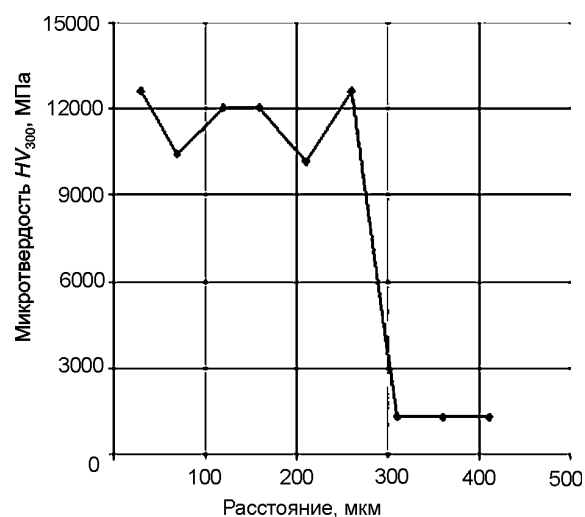
Элемент	Концентрация элементов, интегральное значение в масс. %		
	Покрытие	Переходная зона	Подложка
C	1,11	0,77	–
Al	0,10	1,42	–
Si	2,31	0,84	–
Cr	19,88	8,77	–
Fe	4,09	1,55	–
Co	3,21	1,86	–
Ni	59,60	25,81	–
W	9,71	7,06	–
Cu	–	51,93	100

На основе проведенного эксперимента было сделано заключение, что дисперсность порошкового материала для нанесения покрытий с использованием устройства CDS должна быть в пределах 20 – 40 мкм.

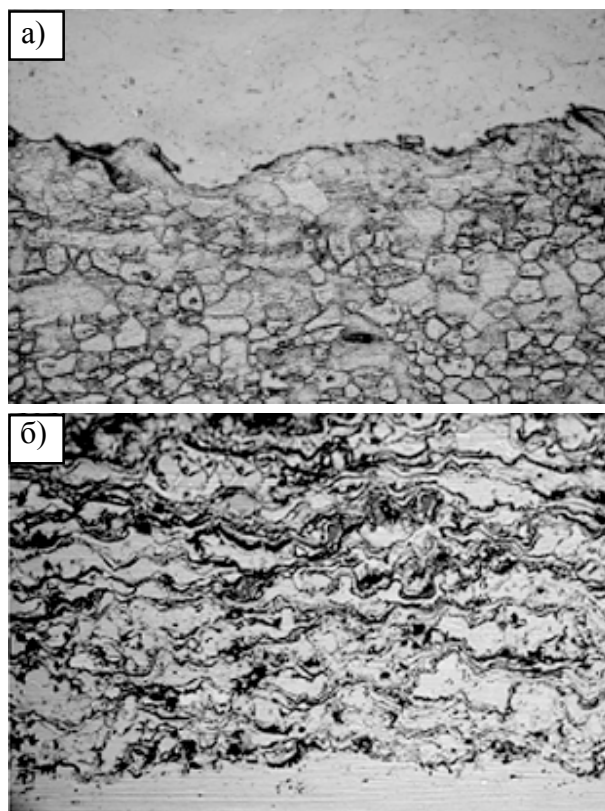
Для дальнейшего проведения работ был взят стандартный порошок, используемый в устройствах HVOF, имеющий дисперсность 20 – 40 мкм (AMPERIT®584.054 Cr₃C₂-NiCr 75% – 25%). На основе опубликованных результатов проведена сравнительная оценка эффективности разработанного устройства CDS с известными устройствами HVOF.

Покрытия наносили на образцы из материала ст. 3. Расход газов при нанесении покрытия составлял – $G_{\text{C}_3\text{H}_8} = 0,57 \text{ м}^3/\text{ч}$; $G_{\text{O}_2} = 2,6 \text{ м}^3/\text{ч}$; $G_{\text{возд.}} = 1,8 \text{ м}^3/\text{ч}$. Производительность – 0,8 кг/час. Расход транспортирующего газа (воздух) – 0,65 м³/ч. Частота следования импульсов – $S = 12 \text{ Hz}$.

Металлографический анализ показал, что при толщине покрытия 0,3 мм, твердость $HV_{(300)} = 1000 - 1200 \text{ МПа}$ (рис. 4). Коэффициент использования материала свыше 80%.

Рис. 4. Микротвердость покрытия, полученного CDS из порошка (AMPERIT®584.054 Cr₃C₂-NiCr).

Металлографический анализ показывает, что покрытие Cr₂C₃-NiCr плотное (пористость < 1,8%), имеет хорошее прилегание к подложке (рис. 5). Под слоем покрытия просматриваются деформированные зерна подложки, что, по-видимому, является следст-

Рис. 5. Вид шлифа покрытия из порошка Cr₂C₃-NiCr, нанесенного кумулятивно-детонационным устройством. а) – вид границы покрытия X250 после травления основы в 3% HNO₃; б) – вид покрытия X400 после электролитического травления в хромовом ангидриде.

вием соударения высокоэнергетических и достаточно твердых порошинок с подложкой. Материал покрытия содержит хорошо деформированные дискретные частицы исходного материала, без трещин и крупных пор.

В настоящее время опубликовано достаточно много информации об исследованиях и отработке HVOF технологий нанесения жаропрочных покрытий. Например [14], при нанесении 1,5 кг/час порошка Cr3C2-NiCr расход пропана составлял 5,2 м³/час, кислорода – 18 м³/час и воздуха – 24 м³/час. Покрытие имело толщину 200 мкм и твердость $HV_{300} = 840 \pm 73$. В статье [15] приведены результаты нанесения покрытий из порошка Cr3C2-NiCr с использованием HVOF технологии, где окислителем является воздух. При расходе порошка 2 кг/час потребление керосина составляло 23 кг, а воздуха – 200 м³/час. Твердость полученного покрытия $HV_{300} = 1150$ МПа. Сравнительный анализ основных, технических и экономических параметров технологий газотермического напыления покрытий Cr3C2-NiCr показывает преимущество CDS. При использовании CDS для получения покрытий из стандартного порошка Cr3C2-NiCr расход пропаноокислородной смеси составлял 3,17 м³ на 0,8 кг покрытия. По данным [4, 5, 14, 15] на напыление 1 кг покрытия такого же качества расходуется 10 – 25 м³ горючей смеси. Кроме того, все эти системы энергоемки и требуют активного охлаждения. Суммарно затрачивается 30 – 50 кВт на работу компрессора высокого давления и систем охлаждения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Был проведен сравнительный анализ экспериментальных исследований, нового кумулятивно-детонационного CDS и известных HVOF устройств для газотермического нанесения покрытий. Известно, что, например, для напыления покрытия из порошка Cr3C2-NiCr стандартным устройством HVOF, используют более 10 м³ компонентов горючей смеси на 1 кг покрытия. Кумулятивно-детонационное устройство расходует на 1 кг покрытия около 4,0 м³ кислородно-пропановой газовой смеси. Для комплектации устройств CDS используется стандартное оборудование и приборы низкого давления до 0,2 МПа, что

обеспечивает безопасность и более полное использование газов из баллонов. В устройстве CDS сгорание рабочей смеси осуществляется с высокой частотой, что обеспечивает возможность реализации квазинепрерывной технологии газотермического напыления покрытий и комплектацию его стандартными порошковыми питателями, используемыми для работы в плазменных устройствах. Известно, что в HVOF устройствах используют газы высокого давления (4 МПа), что повышает стоимость газовых пультов, снижает эффективность работы газобаллонных систем и предъявляет повышенные требования по безопасности работ.

Низкая тепловая мощность, а также низкие давление газов и затраты энергетических ресурсов упрощают оборудование и обеспечивают создание простой и работоспособной конструкции технологического устройства CDS. Сменным соплом служит стандартная трубка, работоспособность которой выше 1000 часов и стоимость в десятки раз ниже, чем сопла HVOF.

Высокая скорость обеспечивает перемешивание порошка с материалом подложки, что гарантирует высокую работоспособность тонких покрытий.

Разработанную нами конструкцию устройства, возможно, использовать для нанесения покрытий из тугоплавких и легкоплавких материалов. А кратковременность и локальность теплового воздействия на поверхность изделия уменьшает зону термического влияния и расширяет область применения технологии.

Отличительной особенностью технологического оборудования является простота в обслуживании, низкая стоимость и высокая эффективность использования материально-энергетических ресурсов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Wielage B., Rupprecht C., Paczkowski G., Menzen R., Weissenfels G., Bernhardt H.-U., Runkel M. A new way in HVOF technology – CFD optimized TOPGUN@AIRJET for powder and wire//Proceedings of ITSC 2008, Maastricht, The Netherlands. – 2008. – P. 145-150.
2. Chivavibul P., Watanabe M., Kuroda S., Kawakita J., Komatsu M., Sato K., Kitamura J. Development of WC-Co coatings deposited by

- warm spray process//Proceedings of ITSC 2008, Maastricht, The Netherlands.– 2008. – P. 64-69.
3. Korobov Y., Filippov M. HVOF coating application in steel-making process//Proceedings of ITSC 2008, Maastricht, The Netherlands. – 2008. – P. 1362-1365.
 4. Meyer P., Rusch W. Production Coating Cost Comparison//Proceedings of ITSC 2003, Orlando, Florida, USA. – 2003. – P. 123-128.
 5. Wang R.J., Xu L., Zhang T.J., Huang X.O., Luo H.J. Development and Application of DZ9000E Portable HVOF System//Proceedings of ITSC 2007, Beijing, China.– 2007.– P. 577-581.
 6. Blose R., Roemer T., Nichols R., Mayer A., Beatty D.E. Automated cold spray system: Description of equipment and performance data//Proceedings of ITSC 2005, Basel, Switzerland. – 2005. – P. 56-64.
 7. Hoell H., Richter P. KINETIKS®4000 – new perspective with cold spraying//Proceedings of ITSC 2008, Maastricht, The Netherlands. – 2008. – P. 477-478.
 8. Jodoin B., Richer P., Вйрубй G., Ajdelsztajn L., Yandouzi M., Erdi A. Pulsed-Cold Gas Dynamic Spraying Process: Development and Capabilities//Proceedings of ITSC 2007, Beijing, China. – 2007. – P.19-24.
 9. Kitamura J., Sato K., Aoki I., Sakaki K., Takahata M., Shimizu Y. Mechanical properties of WC/Co coatings prepared by cold spraying//Proceedings of ITSC 2008, Maastricht, The Netherlands. – 2008. – P.1244-1248.
 10. Parco M., Barykin G., Fagoaga I., Vaquero C. Development of wear resistant ceramic coatings by HFPD//Proceedings of ITSC 2008, Maastricht, The Netherlands. – 2008. – P.140-144
 11. Tyurin Y.N., Pogrebnjak A.D. Advances in the development of detonation technologies and equipment for coating deposition//Surface and Coatings Technology. –1999. – Т. 111. – С. 269-275.
 12. Тюрин Ю.Н., Колісниченко О.В. Спосіб детонаційного напилення покриття і прилад для його здійснення/Патент України на винахід № 83831, 26.08.2008
 13. Погребняк А.Д., Братушка С.Н., Углов В.В., Дуб С.Н., Колісниченко О.В., Алонцева Д.Л., Тюрин Ю.Н., Шипиленко А.Н. Структура и свойства покрытия из Ni-Cr-B-Si-Fe/WC-Co, нанесенного на подложку из стали и меди//Физическая инженерия поверхности – 2008. – Т. 6, № 1-2. – С. 92-97.
 14. Magnani M., Suegama P.H., Benedetti A.V. et. all. The application of Cr₃C₂-NiCr coatings to improve the corrosion and wear properties of an aa7050 alloy//Proceedings of ITSC 2008, Maastricht, The Netherlands.–2008. – P. 1366-1371.
 15. Matthews S., Hyland M., James B. Single impact erosion studies of Cr₃C₂-NiCr coating: the role of microstructure variation//Proceedings of ITSC 2008, Maastricht, The Netherlands. – 2008. – P. 1371-1378

**ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ
ЕФЕКТИВНОСТІ
КУМУЛЯТИВНО-ДЕТОНАЦІЙНОГО
Й HVOF ПРИСТРОЇВ ДЛЯ
ГАЗОТЕРМІЧНОГО НАПИЛЕННЯ
ПОКРИТТІВ**

**Ю.Н. Тюрін, А.Д. Погребняк,
О.В. Колісниченко**

Проведено порівняльний аналіз ефективності кумулятивно-детонаційного пристрою для газотермічного напилення покриттів HVOF установками, які серійно випускаються. Відмінною рисою кумулятивно-детонаційного пристрою є наявність двох камер, де відбувається згоряння горючих сумішей із частотою 10 – 30 Гц. Простоті в обслуговуванні технологічне встаткування забезпечує низьку вартість і високу ефективність процесу напилення та ощадливе використання матеріально-енергетичних ресурсів.

**COMPARATIVE ANALYSIS OF
AN EFFICIENCY OF
CUMULATIVE-DETONATION AND HVOF
DEVICES, WHICH ARE APPLIED FOR
GAS-THERMAL DEPOSITION OF
COATINGS**

**Y.N. Tyurin, A.D. Pogrebnjak,
O.V. Kolisnichenko**

A comparative analysis was performed for a cumulative-detonation device, which is applied for coating deposition, and HVOF devices of serial production. A peculiar feature of the cumulative-detonation device is an availability of two chambers, in which combustion mixtures are burning with 10 to 30 Hz frequency. Being simple in servicing, this technological equipment has a low cost and can provide highly efficient deposition process, allowing simultaneously essential economy of materials and energy.