

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОЦЕССА НАПЫЛЕНИЯ ПОКРЫТИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОКАМЕРНОГО ДЕТОНАЦИОННОГО УСТРОЙСТВА

О. В. КОЛИСНИЧЕНКО<sup>1</sup>, Ю. Н. ТЮРИН<sup>1</sup>, Р. ТОВБИН<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>Sputtek Inc. Гудмарк плэйс 1, № 4, Торонто, Онтарио, Канада M9W 6M1.

Многокамерное детонационное устройство предназначено для нанесения покрытий с использованием порошковых материалов. Нагрев и ускорение порошков осуществляется продуктами детонационного сгорания горючей газовой смеси пропана, кислорода и воздуха с частотой 20 Гц и выше. Отличием многокамерного детонационного устройства является наличие дополнительной камеры сгорания, которая повышает газодинамические параметры продуктов детонации и эффективность процесса напыления. Определено влияние особенностей конструкции устройства на газодинамические параметры продуктов детонации. Скорость продуктов детонации достигает 1520 м/с, давление детонационной волны примерно 3,5 МПа. Скорость напыляемых частиц при использовании данного устройства достигает 1200 м/с. Устройство оснащено бесклапанной системой подачи газов и порошка, что обеспечивает надежную работу при высокой частоте инициирования детонации (до 50 Гц). Коэффициент использования материала при этом достигает 82 и 67 % для порошков кермета и оксидной керамики соответственно. Получаемые при этом покрытия характеризуются малой пористостью (<1 %) и высокой адгезией к основе. Библиогр. 13, табл. 1, рис. 6.

*Ключевые слова:* многокамерное детонационное устройство, скорость и давление продуктов детонации, коэффициент использования материала, скорость и протяженность порошковой струи

етод напыления покрытий, основанный на использовании процессов детонационного сгорания горючих газовых смесей, остается динамически развивающимся технологическим направлением со времени выдачи в 1955 г. первого патента [1]. В 1960-х годах в Киеве под руководством академика Г. В. Самсонова начались работы по освоению этой технологии, и в начале 1980-х годов существовало уже около десятка модификаций детонационных пушек для напыления. С тех пор накоплен богатый практический материал. Исследование физических процессов детонационного напыления позволило оптимизировать технологию и конструкцию устройств, повысить качество покрытий. Однако массовое применение детонационной технологии в промышленности было ограничено низкой производительностью, трудностями дозирования и ввода порошка в импульсную струю продуктов сгорания, относительно низким коэффициентом использования материала (КИМ) и низкой надежностью детонационных устройств в целом. Перспективным направлением развития является создание бесклапанных детонационных установок, работающих на повышенных частотах. Впервые было разработано и изготовлено бесклапанное высокочастотное детонационное устройство (частота свыше 80 Гц) в 1976 г. [2]. В 1976–1980 годы были разработаны способы детонационного нанесения покрытий и устройства, где осуществлялась непрерывная подача компонентов

горючей смеси, газодинамическое смешивание и использование в качестве горючего газа пропана, метана и других углеводородных газов [3]. Высокочастотную детонационную пушку HFPD [4] можно отнести к одному из вариантов такого же класса устройств.

Материал покрытия при газотермическом напылении формируется в результате взаимодействия потока дисперсных частиц (порошка) с материалом обрабатываемой детали. Ключевыми параметрами, определяющими физико-химические особенности взаимодействия материалов и саму возможность формирования качественных покрытий, являются скорость и температура частицы в момент столкновения с подложкой. Эти параметры определяют характер контакта: динамику растекания материала дисперсной частицы, степень деформации подложки и прочее. В настоящее время дальнейшее развитие высокоскоростных газотермических методов формирования покрытий направлено на увеличение кинетической энергии порошка при снижении его температуры. Высокая скорость частиц при более низкой их температуре позволяет пластически деформировать и структурировать материал порошка. Это обеспечивает возможность формирования наносубмикроструктурных, плотных материалов покрытия, без окисления и с высокими параметрами адгезии и когезии.

Для получения высокоскоростной газопорошковой струи целесообразно использовать де-

тонационные устройства с нестационарными процессами горения [5]. Использование нестационарных режимов детонационного сгорания позволяет существенно повысить качественные характеристики наносимых покрытий, а также уменьшить массу и размеры устройства. Реализовать режим пересжатой детонации можно, например, в сужающихся каналах [6] или при электрическом разряде емкостного накопителя энергии за фронтом детонационной волны [7]. Немаловажным фактором в настоящее время также является степень автоматизации технологии. Примером контроля за технологическим процессом может служить компьютеризированный детонационный комплекс CCDS Dragon [8]. Несмотря на достигнутые успехи, проблемы по повышению эффективности взаимодействия струи продуктов сгорания и частиц порошка, а также по автоматизации дозирования и увеличению точности дозирования остаются. Важнейшей проблемой является также увеличение скорости и давления продуктов сгорания и, соответственно, скорости порошковой струи. Необходимо также обеспечить полную автоматизацию работы устройства и высокие показатели его надежности и ремонтпригодности.

Для решения этих вопросов было разработано автоматизированное многокамерное детонационное устройство (МКДУ) [9]. В этом устройстве реализуется режим детонационного горения газовой смеси в специально спрофилированных камерах. Аккумулирование энергии сгорания от двух камер в цилиндрическом стволе обеспечивает формирование высокоскоростной струи продуктов сгорания, которая ускоряет и нагревает напыляемый порошок. Целью проведенной работы было исследование давления за фронтом детонационной волны, скорости истечения продуктов детонации и напыляемых частиц порошка при использовании данного устройства. Для достижения высоких параметров коэффициента использования материалов КИМ разработан специальный бесклапанный узел дозирования и подачи в ствол доз порошка. Узел дозирования включает: порошок питатель, обеспечивающий смешивание и транспортировку газопорошковой смеси по трубопроводу, и газодинамический дозатор. Эти устройства обеспечивают точную выдачу в ствол МКДУ порций (доз) порошка, синхронизированную с частотой (20...50 Гц) генерирования детонации.

**Оборудование и методика исследований.** *Материалы, особенности конструкции и принципы работы МКДУ.* Исследования, оптимизацию технологических режимов и конструкции проводили на лабораторном экспериментальном макете МКДУ (рис. 1). Расход компонентов горючей сме-

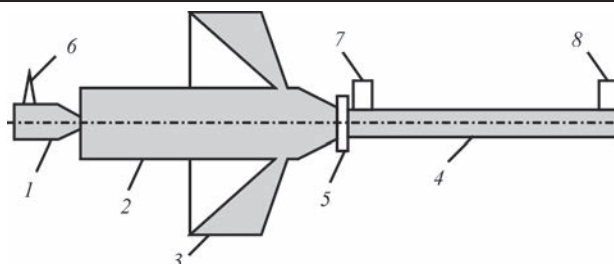


Рис. 1. Схема многокамерного детонационного устройства (обозначения см. в тексте)

си варьировался в пределах: 0,6...1,6 м<sup>3</sup>/ч пропана и 3,0...9,0 м<sup>3</sup>/ч кислорода. Устройство имеет три камеры: 1 — форкамера для инициирования процесса детонации; 2 — основная цилиндрическая камера, где происходит развитие детонационного режима сгорания; 3 — кольцевая камера со щелевым выходом в цилиндрический ствол 4. Кольцевая камера 3 используется для сжатия продуктов сгорания и создания дополнительной струи, которая «подпирает» в цилиндрическом стволе 4 продукты детонации от основной камеры 2. Для ускорения и нагрева в ствол подается доза порошка. Ствол может иметь внутренний диаметр 16...20 мм и длину 300...520 мм и выбирается в зависимости от свойств материала напыляемого порошка. Сужение рабочего объема цилиндрической камеры диаметром 24 мм до диаметра ствола 16 мм обеспечивает пересжатие режима детонационного горения. Последующее поджатие продуктов сгорания происходит за счет кольцевой камеры. Газодинамический процесс инициирования детонации в кольцевой камере обеспечивает схлопывание продуктов сгорания по оси ствола, что существенно повышает их скорость, давление и плотность.

Перед фронтом высокоскоростных продуктов сгорания подается доза порошкового материала. Эта доза подается через кольцевую щель специального газодинамического узла подачи 5. Размер щели в радиальном направлении подбирается экспериментально и является фактором оптимизации для конкретного порошка. В качестве параметра оптимизации использовали КИМ, определяемый весовым методом. Иницирование детонационного режима сгорания горючей смеси осуществлялось автомобильной свечой зажигания 6. В экспериментах по оптимизации конструкции, замеру скорости газопорошковой струи и напылению покрытий использовались порошки фирмы Н. С. Starck: AMPERIT® 740,0 — Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (дисперсность 5,6...22,5 мкм) и AMPERIT® 554,074 — WC-Co-Cr (86–10–4 %), дисперсность 15...45 мкм. Режимы напыления указаны в таблице.

*Методики исследований давления, скорости продуктов детонации и частиц порошка.* Измерение давления в продуктах детонации и скоро-

Режим напыления  $Al_2O_3$  и WC–Co–Cr с использованием МКДУ

Режим		Порошок		
		$Al_2O_3$	WC–Co–Cr	
Частота следования импульсов, Гц		20	20	
Длина ствола/диаметр (мм)		500/16	300/18	
Расход порошка		0,7	1,4	
Расход газов, м <sup>3</sup> /ч	1 камера	O <sub>2</sub>	4,4	3,2
		воздух	0,14	1,6
		C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0,83	0,72
	2 камера	O <sub>2</sub>	4,0	3,2
		воздух	0,25	1,4
		C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0,82	0,75
Транспортирующий газ – азот		0,9	0,9	
Удельный расход пропана, м <sup>3</sup> /кг		2,3	1,0	

сти волны детонации осуществлялось с использованием пьезоэлектрических датчиков давления ЛХ–611, которые калибровались на ударной трубе с известными параметрами. Первый датчик 7 (см. рис. 1) закрепляли на расстоянии примерно 60 мм от выхода кольцевой камеры, непосредственно на входе в ствол. Второй датчик 8 закрепляли на выходе из ствола. В экспериментах использовался ствол длиной 500 мм и диаметром 16 мм. Расстояние между осями датчиков 525 мм. Эксперименты проводили с использованием горючей смеси пропана и кислорода в стехиометрической пропорции. Сигнал от датчиков через преобразователь сигналов АЦП L-Card783 записывался с использованием программы Powergraph 3.0.

Скорость порошка определяли устройством, которое визуализировало светимость нагретой газопорошковой струи. В качестве фотоприемника использовали два быстродействующих германиевых фотодиода ФД287 (время нарастания фронта импульса 10 нс) с рабочим спектральным диапазоном  $\lambda = 0,5...1,7$  мкм. После усиления сигнал с датчиков поступал на АЦП L-Card783 и записывался с использованием программы Powergraph 3.0. Усилитель и принимающие фотодиоды были удалены от детонационного устройства, а сигнал от газопорошковой струи подводился к фотоприемнику посредством оптоволоконных кабелей. Оси последних располагались перпендикулярно к оси газопорошковой струи. Расстояние от среза сопла до оси измерительной системы изменялось в диапазоне 40...100 мм. Известно, что плотность потока излучения от нагретого газа много ниже, чем от частиц порошка, что позволяет пренебречь излучением от продуктов сгорания и фиксировать излучение только от нагретого порошка.

**Металлографические исследования.** Для металлографических исследований и фазового анализа микрошлифов покрытий использовались оптический микроскоп Olympus GX51 и электронный сканирующий микроскоп Quanta 200 3D, оснащенный спектрометром рентгеновско-

го излучения системы PEGASUS фирмы EDAX. Пористость покрытий была определена посредством анализа микрошлифов, выполняемого системой обработки изображений, которая состояла из оптического инвертированного микроскопа OLYMPUS GX51 и программного обеспечения для количественного анализа изображения. Измерения твердости проводили с помощью автоматической системы анализа микротвердости DM-8 по методу Виккерса при нагрузке на индентор 300 г. Определение адгезии покрытий из порошка WC–Co–Cr определяли по клеевой методике согласно стандарту ASTM C633.

**Результаты исследований и обсуждение.** Давление и скоростные параметры продуктов детонации. Определение скорости стационарной детонационной волны устройства осуществлялось при полном его заполнении горючей смесью. Горючую смесь в кольцевую камеру (см. рис. 1) не подавали.

Эксперименты показали, что время прохождения детонационной волны между датчиками составляет в среднем 0,25 мс, а скорость  $2100 \pm 100$  м/с. Для кислородно-пропановой смеси стехиометрического соотношения значение скорости стационарной детонации, соответствующей условиям Чепмена–Жуге, достигает 2450 м/с [10]. Полученная скорость меньше из-за энергетических потерь при движении в стволе диаметром 16 мм. Кроме того, возможно подмешивание воздуха в процессе за-

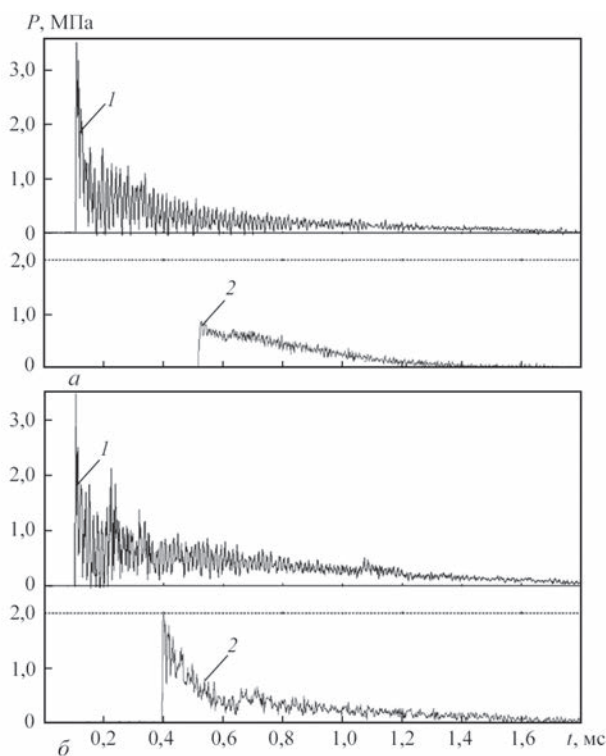


Рис. 2. Изменение давления  $P$  во времени:  $a$  — с использованием одной камеры;  $b$  — при подключении второй камеры (1 — на входе в ствол, 2 — на выходе)

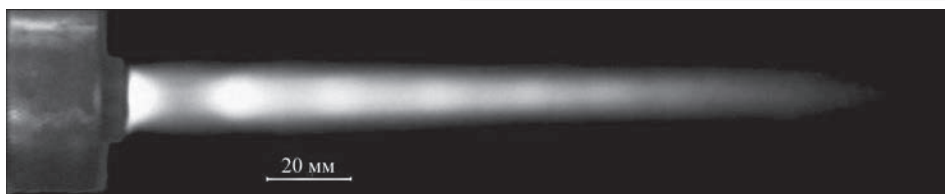


Рис. 3. Вид сверхзвуковой импульсной струи, истекающей из сопла детонационного устройства

полнения камер между импульсами и отклонение от стехиометрии.

Кардинально картина меняется, если детонационное устройство заполняется горючей газовой смесью до уровня расположения первого датчика. Такое заполнение внутреннего объема устройства компонентами горючей смеси используется при осуществлении процесса напыления. При этом процесс детонации заканчивается до входа в ствол, происходит переход детонационной волны в ударную, которая развивается внутри цилиндрического ствола. При использовании одной камеры (рис. 2, а) происходит сильное затухание ударной волны по мере прохождения вдоль ствола. Уменьшаются давление, скорость и протяженность зоны продуктов сгорания.

Одновременное использование второй (кольцевой) камеры позволяет значительно изменить физические параметры за ударной волной (рис. 2, б). Вторая камера создает дополнительную струю, которая следует по продуктам детонации за первой детонационной волной и подпитывает их энергией. Первый датчик фиксирует образование второго фронта ударной волны. Амплитуда ударной волны на втором датчике составляет 2,0 МПа, что в два раза превышает показания при использовании одной камеры. Протяженность потока продуктов сгорания, имеющих повышенное давление на выходе из сопла, также больше и составляет 1,2 мс. Средняя скорость ударной волны между датчиками при этом составляет 1750 м/с, тогда как при использовании одной камеры — 1300 м/с. Чтобы оценить скорость газа за фронтом плоской прямой ударной волны воспользуемся выражением [11]

$$V = \frac{2}{k+1} D \left( 1 - \frac{c_1^2}{D^2} \right),$$

где  $k = 1,3$  — показатель адиабаты;  $D$  — скорость ударной волны;  $c_1$  — скорость звука в невозмущенной среде.

Тогда оценочная средняя скорость продуктов сгорания в стволе составит 1130 и 1520 м/с при использовании одной и двух камер соответственно.

Непосредственно оценить скорость истечения продуктов горения на выходе из ствола можно также по длине волны периодической структуры сверхзвуковой струи в неподвижной окружающей среде [12]

$$L = 2,613r\sqrt{M-1},$$

где  $r$  — радиус сопла детонационного устройства;  $M = V/a_0$  — число Маха;  $L$  — длина волны периодической структуры (расстояние до скачка уплотнения),  $a_0$  — местная скорость звука в продуктах сгорания.

На рис. 3 приведено изображение сверхзвуковой импульсной струи при работе МКДУ на двух камерах со стволом диаметром 16 мм. Структура газовой струи характерна для сверхзвукового истечения в режиме недорасширения и согласуется с взрывным характером работы детонационного устройства, при котором давление в камере значительно превышает давление в окружающей среде.

Исходя из данных эксперимента ( $a_0 \approx 1000$  м/с,  $r = 8$  мм,  $L \approx 27$  мм), получим, что скорость истечения  $V \approx 1600$  м/с. Этот результат коррелирует с оценкой скоростей истечения продуктов сгорания, приведенной выше по результатам экспериментального исследования давлений в продуктах сгорания и ударной волны для ствола диаметром 16 мм и длиной 500 мм.

Проведенные исследования подтверждают, что скорость продуктов сгорания существенно повышается при подключении второй камеры. При этом в стволе формируется более протяженный поток продуктов сгорания, имеющий два максимума давления и более высокую скорость. Такой поток более эффективен при ускорении частиц порошка.

*Оптимизация узла подачи порошка в МКДУ.* Принимая во внимание то, что МКДУ работает на повышенных частотах (20 Гц и больше), приме-

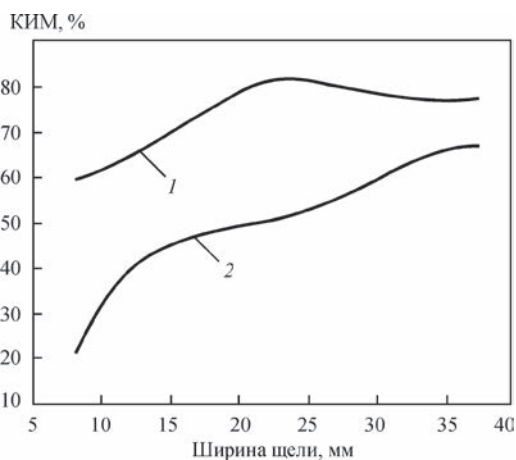


Рис. 4. Изменение КИМ в зависимости от ширины щели узла подачи порошка: 1 — WC-Co-Cr; 2 — Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

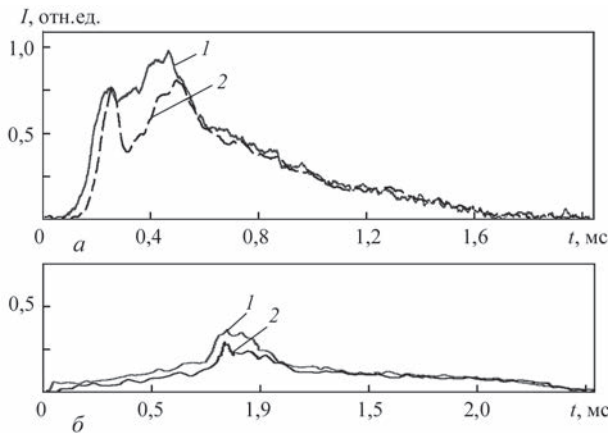


Рис. 5. Излучение газопорошковой струи  $Al_2O_3$  (а) и  $WC-Co-Cr$  (б), фиксируемое с использованием германиевых фотодиодов ФД287: 1 — на расстоянии 30 мм от среза сопла; 2 — на расстоянии 60 мм

нять импульсные клапанные системы подачи порошка, содержащие движущиеся механические части, нерационально с точки зрения надежности.

Используемый в МКДУ специально разработанный узел подачи порошка имеет полость, в которую поступает порошок из дистанционно удаленного питателя. В процессе напыления порошок попадает в ствол установки через кольцевую щель в период времени прохождения волны разряжения. Момент впрыска порошка в ствол под последующий импульс определяется длиной щели в радиальном направлении (ширина щели). Для достижения максимального КИМ был изготовлен размерный ряд узлов подачи порошка в количестве 5 шт. Влияние ширины щели на КИМ для  $Al_2O_3$  и  $WC-Co-Cr$  показано на рис. 4. Оксид алюминия имеет гораздо меньшую плотность, чем кермет и, следовательно, меньшую инерцию. Для получения максимального КИМ при напылении  $Al_2O_3$  (67 %) ширина щели должна составлять 37 мм. При напылении  $WC-Co-Cr$  — 23 мм. При этом КИМ будет достигать 82 %.

*Скоростные параметры порошка при нанесении покрытия.* Визуализация интегрального излучения нагретой газопорошковой струи позволяет оценить ее динамику и протяженность. Скорость порошковой струи определялась с учетом временного сдвига сигналов от первого и второго фотодатчиков. На рис. 5 показано изменение во времени излучения от газопорошковой струи при нанесении покрытий из  $Al_2O_3$  и  $WC-Co-Cr$ . Режимы напыления приведены в таблице. Полученные результаты усредняли по 20 замерам.

Исследования показали, что длительность истечения газопорошковой струи, содержащей  $Al_2O_3$ , составляет примерно 1,4 мс. Скорость фронта струи на расстоянии размещения напыляемой поверхности (до 60 мм от среза сопла) равна  $1000 \pm 200$  м/с. Такие параметры обеспечивают нанесение качественного покрытия на твердой подложке. Например, на рис. 6, а приведен поперечный шлиф покрытия из данного порошка, нанесенного на образец из низкоуглеродистой стали. Исследования показали, что покрытие имеет пористость  $< 1$  %. Максимальная твердость  $HV_{0,3}$  —  $1320 \pm 25$  получена в верхних слоях покрытия. Твердость плавно снижается примерно на 30 % и в слоях, прилегающих к границе, имеет значение  $HV_{0,3}$  —  $900 \pm 25$ . Состав материала покрытия: корунд ( $\alpha-Al_2O_3$ ) до 47 %; остальные фазы — более мягкие модификации оксида ( $\gamma$  и  $\theta-Al_2O_3$ ).

При нанесении покрытий из керметов, например,  $WC-Co-Cr$ , температуру продуктов сгорания понижали путем разбавления горючей смеси воздухом (см. табл. 1). Это необходимо для предотвращения процесса термического разложения высших карбидов [13], приводящего к снижению эксплуатационных свойств покрытий. Понижение температуры порошка влияет и на интенсивность излучения, улавливаемого фотодиодами (рис. 5, б). Повышенное содержание воздуха в горючей смеси приводит к снижению скорости продуктов де-

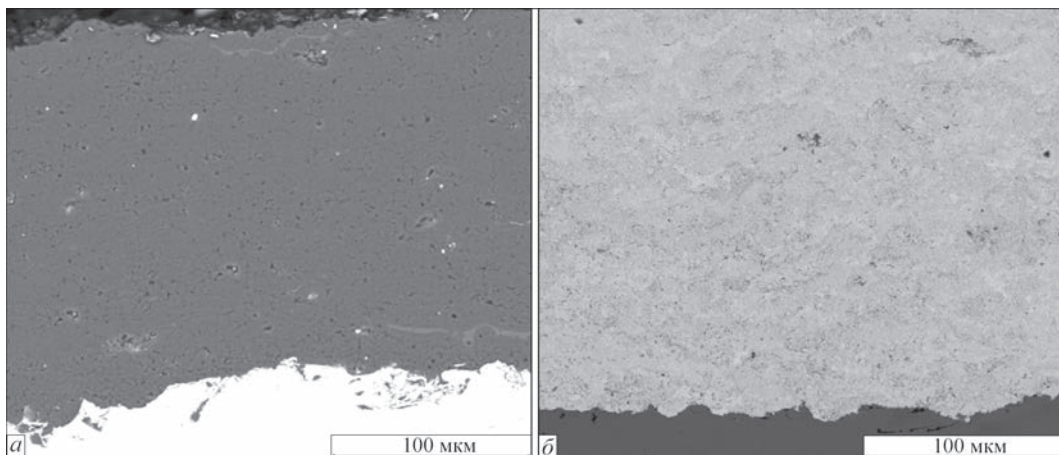


Рис. 6. Микрошлиф поперечного сечения образца с покрытием из порошков: а —  $Al_2O_3$ , дисперсность 5,6...22,5 мкм; б —  $WC-Co-Cr$  (86–10–4 %), дисперсность 15...45 мкм

тонации, а следовательно, и скорости истечения порошка. Исследования показали, что средняя скорость порошка WC–Co–Cr снижается до  $550 \pm \pm 100$  м/с (рис. 5, б), что является достаточным для получения материала покрытия с низкой пористостью  $< 0,7$  % (см. рис. 6, б) и высокой адгезией ( $>80$  МПа) к подложке.

### Выводы

1. Разработано высокочастотное (более 20 Гц) бесклапанное многокамерное детонационное устройство, позволяющее генерировать импульсные струи продуктов сгорания, имеющие два максимума давления (3,5 и 2,0 МПа) за счет кумуляции энергии от цилиндрической и кольцевой камер сгорания.

2. Использование двухкамерной конструкции обеспечило повышение скорости продуктов детонационного сгорания на 35...40 %, что, соответственно, увеличило скорости порошкового материала. Например, для порошка  $Al_2O_3$  дисперсностью 5,6...22,5 мкм, скорость составляла 1200 м/с.

3. Создан газодинамический дозатор порошков, обеспечивающий точную выдачу порции порошка перед иницированием детонации, что повысило КИМ до 82 % для порошков кермета и 67 % для оксида алюминия.

4. На примере исследования двух видов материалов покрытия — кермет WC–Co–Cr и керамика  $Al_2O_3$ , подтверждена высокая эффективность процесса напыления с использованием МКДУ. Покрытия плотные (пористость менее 1 %), имеют высокую адгезию к основе (более 80 МПа). На формирование 1 кг материала покрытия кермета и керамики затрачивалось 1,0 и 2,3 м<sup>3</sup> пропана соответственно, что в 2 раза меньше, чем в известных детонационных устройствах.

### Список литературы

1. Poorman R. M., Sargent H. B., Lamprey H. (1955) *Method and Apparatus Utilizing Detonation Waves for Spraying and other Purposes*. US Pat. 2714563.
2. Тюрин Ю. Н., Ральф С. Е., Шульженко В. А., Семенов Л. В. (1976) Устройство для детонационного нанесения покрытий. СССР, А. с. 669539.
3. Тюрин Ю. Н., Гарбузов А. П. (1983) *Способы детонационного нанесения покрытий*. А. с. 1045491.
4. Endo T., Obayashi R., Tajiri T. et al. (2016) Thermal Spray Using a High-Frequency Pulse Detonation Combustor Operated in the Liquid-Purge Mode. *J. Therm. Spray Technol.*, 25, 3, 494–508.
5. Гавриленко Т. П., Николаев Ю. А., Ульяницкий В. Ю. (2010) Использование пересжатой детонации для нанесения покрытий. *Физика горения и взрыва*, 46, 3, 125–133.
6. Прохоров Е. С. (2011) Приближенный расчет пересжатой газовой детонации в сужающихся каналах. *Вестник НГУ, Сер. Физика*, 6, 2, 5–9.
7. Tyurin Y. N., Pogrebnyak A. D. (1999) Advances in the development of detonation technologies and equipment for coating deposition. *Surf. and Coat. Technol.*, 111, 2–3, 269–275.

8. Shtertser A., Muders C., Veselov S. et al. (2012) Computer Controlled Detonation Spraying of WC/Co coatings containing MoS<sub>2</sub> solid lubricant. *Ibid.*, 206, 23, 4763–4770.
9. Тюрин Ю. М., Колісниченко О. В. (2008) Заявник та патентовласник Ю. М. Тюрін, О. В. Колісниченко. *Способ детонаційного напылення покриття і прилад для його здійснення*. Україна, Пат. 83831.
10. Хитрин Л. Н. (1957) *Физика горения и взрыва*. Москва, МГУ.
11. Баум Ф. А., Станюкович К. П., Шехтер Б. И. (1959) *Физика взрыва*. Москва, Физматгиз.
12. Бай Ши-и. (1960) *Теория струй*. Москва, Гос. изд-во физ.-мат. лит.-ры.
13. Маркашова Л. И., Тюрин Ю. Н., Колісниченко О. В. и др. (2014) Структурно-фазовое состояние износостойких композиционных покрытий системы Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr, нанесенных с использованием многокамерной детонационной установки. *Материалы VII Международной конференции «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах», 15–19 сентября, 2014, г. Одесса*, сс. 37–42.

### References

1. Poorman, R.M., Sargent, H.B., Lamprey, H. (1955) *Method and apparatus utilizing detonation waves for spraying and other purposes*. US Pat. 2714563.
2. Tyurin, Yu.N., Ralf, S.E., Shulzhenko, V.A. et al. (1976) *Device for detonation deposition of coatings*. USSR author's cert. 669539 [in Russian].
3. Tyurin, Yu.N., Garbuzov, A.P. (1983) *Methods of detonation deposition of coatings*. USSR author's cert. 1045491 [in Russian].
4. Endo, T., Obayashi, R., Tajiri, T. et al. (2016) Thermal spray using a high-frequency pulse detonation combustor operated in the liquid-purge mode. *J. Therm. Spray Technol.*, 25(3), 494–508.
5. Gavrilenko, T.P., Nikolaev, Yu.A., Ulyanitsky, V.Yu. (2010) Application of overcompressed detonation of coating deposition. *Fizika Goreniya i Vzryva*, 46(3), 125–133 [in Russian].
6. Prokhorov, E.S. (2011) Approximate calculation of overcompressed gas detonation in converging channels. *Vestnik NGU, Ser.: Fizika*, 6(2), 5–9 [in Russian].
7. Tyurin, Y.N., Pogrebnyak, A.D. (1999) Advances in the development of detonation technologies and equipment for coating deposition. *Surf. and Coat. Technol.*, 111(2–3), 269–275.
8. Shtertser, A., Muders, C., Veselov, S. et al. (2012) Computer controlled detonation spraying of WC/Co coatings containing MoS<sub>2</sub> solid lubricant. *Ibid.*, 206(23), 4763–4770.
9. Tyurin, Yu.M., Kolisnichenko, O.V. (2008) *Method of detonation spraying of coatings and device for its realization*. Pat. 83831, Ukraine [in Ukrainian].
10. Hitrin, L.N. (1957) *Fizika Goreniya i Vzryva*. Moscow, MSU [in Russian].
11. Baum, F.A., Stanyukovich, K.P., Shekhter, B.I. (1959) *Physics of explosion*. Moscow, Fizmatgiz [in Russian].
12. Baj Shi-i (1960) *Theory of jets*. Moscow, Gos. Izd-vo Fiz.-Mat. Lit-ry [in Russian].
13. Markashova, L.I., Tyurin, Yu.N., Kolisnichenko, O.V. et al. (2014) Structure-phase condition of wear-resistant composite coatings of Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr system, deposited using multi-chamber detonation installation. In: *Proc. of 7th Int. Conf. on Mathematical Modelling and Information Technologies in Welding and Related Processes (15–19 September 2014, Odessa, Ukraine)*, 37–42 [in Russian].

О. В. Колісниченко, Ю. М. Тюрін, Р. Товбін

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України.

03680, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11.

E-mail: office@paton.kiev.ua

Sputtek Inc. Гудмарк плейс 1, № 4, Торонто,  
Онтарио, Канада M9W 6M1

ЭФЕКТИВНОСТЬ ПРОЦЕССУ НАПИЛЕНИЯ ПОКРИТИЙ  
БАГАТОКАМЕРНЫМ ДЕТОНАЦИЙНЫМ ПРИБОРОМ

Багатокамерний детонаційний пристрій, призначений для нанесення покриттів з використанням порошкових матеріалів. Нагрівання і прискорення порошоків здійснюється продуктами детонаційного згоряння горючої газової суміші пропану, кисню і повітря з частотою 20 Гц і вище. Відмінністю багатокамерного детонаційного пристрою є наявність додаткової камери згоряння, яка підвищує газодинамічні параметри продуктів детонації і ефективність процесу напилення. Визначено вплив особливостей конструкції пристрою на газодинамічні параметри продуктів детонації. Швидкість продуктів детонації досягає 1520 м/с, тиск детонаційної хвилі приблизно 3,5 МПа. Швидкість частинок, що напилюються, при використанні даного пристрою досягає 1200 м/с. Пристрій оснащено безклапанною системою подачі газів і порошку, що забезпечує надійну роботу при високій частоті ініціювання детонації (до 50 Гц). Коефіцієнт використання матеріалу при цьому досягає 82 і 67 % для порошоків кермету і оксидної кераміки відповідно. Одержані при цьому покриття характеризуються малою пористістю (<1 %) і високою адгезією до основи. Бібліогр. 13, табл. 1, рис. 6.

*Ключові слова:* багатокамерний детонаційний пристрій, швидкість і тиск продуктів детонації, коефіцієнт використання матеріалу, швидкість і протяжність порошкового струменя

O.V. Kolisnechenko<sup>1</sup>, Yu.N. Tyurin<sup>1</sup> and R.Tovbin<sup>2</sup>

<sup>1</sup> E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.  
11 Kazimir Malevich Str., 03680, Kiev, Ukraine.  
E-mail:office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>1 Goodmark place, Unit 4, Toronto, Ontario,  
Canada M9W 6M1

EFFICIENCY OF PROCESS OF COATING SPRAYING  
USING MULTI-CHAMBER DETONATION UNIT

A multi-chamber detonation spaying is designed for coating deposition using powder materials. Heating and acceleration of powders is carried out by detonation combustion products of gas mixture of propane, oxygen and air with 20 Hz frequency and more. A difference of multi-chamber detonation device is presence of additional combustion chamber, which increases gas-dynamic parameters of the detonation products and efficiency of spraying process. Effect of unit design peculiarities on gas-dynamic parameters of detonation products was determined. Velocity of detonation products reached 1520 m/s, detonation wave pressure made approximately 3.5 MPa. Velocity of sprayed particles using this unit reaches 1200 m/s. The unit is equipped with a valveless system for gas and powder feeding. This provides reliable operation at high frequency of detonation initiation ( up to 50 Hz). Spraying deposition efficiency at that reaches 82 and 67 % for cermet powders and oxide ceramics, respectively. Coatings received during this process are characterized with small porosity (<1 %) and high adhesion to substrate. 13 Ref. 1 Tabl., 6 Fig.

*Keywords:* multi-chamber detonation unit, velocity and pressure of detonation products, spraying deposition efficiency, velocity and length of powder jet

Поступила в редакцию 18.05.2017



**XV МЕЖДУНАРОДНЫЙ ФОРУМ  
«ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ  
КОМПЛЕКС УКРАИНЫ:  
НАСТОЯЩЕЕ И БУДУЩЕЕ»**

7 - 9 ноября 2017 г., Киев, Международный выставочный центр

В рамках форума состоится

**X Международная специализированная выставка  
«ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ. ВОЗОБНОВЛЯЕМАЯ ЭНЕРГЕТИКА – 2017»**

**Тематика выставки**

Возобновляемая энергетика, альтернативные виды топлива, энергоэффективные и энергосберегающие технологии, оборудование, материалы в энергетике, промышленности, строительстве, ЖКХ, АПК.

<http://mvc-expo.com.ua/>