

ДЕТОНАЦИОННЫЕ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ДЛЯ НАПЫЛЕНИЯ ПОРОШКОВЫХ ПОКРЫТИЙ (ОБЗОР)

*Харламов Ю.А.¹, Вишневский Д.А.¹, Петров П.А.¹, Жильцов А.П.², Харитоненко А.А.²,
Бочаров А.В.²*

¹*Донбасский государственный технический университет, Алчевск;*

²*Липецкий государственный технический университет, Липецк*

Ключевые слова: газовая детонация, газотермическое напыление покрытий, горючие смеси газов, двухфазная струя, камеры сгорания, поперечное сечение, порошки.

Аннотация. Обобщены и проанализированы конструктивные схемы детонационных камер сгорания (ДКС), используемых главным образом в установках для детонационно-газового напыления покрытий (ДГУ). Сформулированы основные требования к импульсным камерам сгорания. Разработана классификация ДКС по основным признакам, в том числе по функциональному назначению, виду используемого топлива, характеру подачи газов, по геометрическим параметрам – вид оси каналов горения и их количество, форма и размеры поперечного сечения и пр.; компоновке и др. Приведены и рассмотрены схемы прямых многоканальных детонационных камер сгорания с прямоугольным и кольцевым сечением, с экранами в рабочей камере, с начальной цилиндрической секцией и кольцевым выходным сектором, с регулируемым проходным сечением, с изменяющимся по длине сечением, двух- и трехкамерные, а также многосекционные камеры сгорания. Показана возможность использования пересжатых детонационных волн в газах (ДВ), получаемых в сужающихся ДКС, что расширяет технологические возможности метода по нанесению покрытий из тугоплавких материалов и открывает перспективы создания малогабаритных ДГУ, включая нанесение покрытий на внутренние поверхности деталей. Даны рекомендации по областям рационального применения рассмотренных схем ДКС и их проектированию.

COMBUSTION CHAMBERS FOR D-GUN SPRAYING OF POWDER COATINGS (OVERVIEW)

*Kharlamov Yu.A.¹, Vishnevskiy D.A.¹, Petrov P.A.¹, Zhiltsov A.P.², Kharitonenko A.A.²,
Bocharov A.V.²*

¹*Donbass State Technical University, Alchevsk;*

²*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Lipetsk State Technical University, Lipetsk*

Keywords: gas detonation, thermal spraying of coatings, combustible mixtures of gases, two-phase jet, combustion chambers, cross section, powders.

Abstract. The design schemes of detonation combustion chambers used mainly in installations for D-Gun spraying of coatings are generalized and analyzed. The basic requirements for pulsed combustion chambers are formulated. A classification of the detonation combustion chambers has been developed according to the main features, including the functional purpose, type of fuel used, the nature of the gas supply, according to geometric parameters - the type of axis of the combustion channels and their quantity, the shape and dimensions of the cross section, etc.; layout, etc. Schemes of direct multichannel detonation combustion chambers with rectangular and annular cross-sections, with screens in the working chamber, with an initial cylindrical section and an annular output sector, with an adjustable flow section, with a section varying in length, two- and three-chamber, as well as multi-section combustion chambers are presented and considered. The possibility of using overcompressed detonation waves in gases obtained in converging chambers is shown, which expands the technological capabilities of the method for applying coatings from refractory materials and opens up prospects for creating small-sized D-Guns, including deposition of coatings on the internal surfaces of parts. Recommendations are given on the areas of rational application of the considered chamber schemes and their design.

Введение. Несмотря на многочисленные исследования детонационно-газового метода, до сих пор нет приемлемых представлений о физических механизмах явлений, протекающих в детонационно-газовых установках (ДГУ) для напыления покрытий, а также рекомендаций

по проектированию их основных узлов и элементов. Основной элемент ДГУ – камера сгорания, где организуется регулярное импульсное (пульсирующее) сжигание газовой смеси, нагрев и ускорение частиц порошка, формирующих напылительную струю [1, 2].

Цель работы. Обобщение и анализ конструктивных схем детонационных камер сгорания, используемых в установках для детонационно-газового напыления покрытий и разработка рекомендаций по их проектированию.

Основные требования к детонационным камерам сгорания (ДКС): строгое поддержание состава и степени заполнения ДКС горючей смесью; точное дозирование и подача порошка в оптимальную по технологическим условиям зону ДКС; обеспечение инициирования детонации вблизи закрытого торца ДКС или короткого преддетонационного расстояния; максимально возможное эффективное использование энергии потока продуктов детонации в процессе напыления; высокая частота повторения циклов напыления и пр. Конструкция ДКС должна обеспечить: минимальные рабочий объем ДКС и расход газов; исключение преждевременного воспламенения горючей смеси от горячих стенок ДКС и контакта с остаточными продуктами сгорания; надежную локализацию детонации в рабочем объеме ДКС; надежную работу систем подачи газов и порошка и др.

Классификация импульсных камер сгорания

1. По выполняемым функциям в составе ДГУ различают: *основные* и *вспомогательные ДКС*. Основные ДКС предназначены для выполнения основного назначения – формирования напылительного гетерогенного потока при нагреве и ускорении частиц порошка. Вспомогательные ДКС могут быть использованы для выполнения вспомогательных переходов и воздействий – форкамерного зажигания с переходом горения в детонацию, нагрева или предварительной очистки напыляемой поверхности, оплавления напыленного покрытия.

2. По роду используемого топлива различают ДКС работающие на: газообразном, жидком или комбинированном (на газовом и жидком) топливе.

3. По направлению потоков подаваемой свежей горючей смеси и истечения продуктов детонации: *прямоточные* и *противоточные ДКС*. В прямоточных ДКС эти направления одинаковы, в противоточных – противоположны.

4. По характеру подачи газов различают ДКС: с *циклической* (клапанной) и *бесклапанной* подачей газов.

5. По виду оси основной камеры различают ДКС: *прямые* и *изогнутые* (с поворотами).

6. По количеству секций в рабочей камере различают ДКС: *односекционные* и *многосекционные*.

7. По поперечному сечению рабочей камеры различают ДКС: с *постоянным сечением* и *переменным сечением* (профилированные).

8. По расположению точки ввода порошка различают ДКС: с вводом порошка у закрытого торца, в средней части, у выходного (открытого) торца и снаружи открытого торца.

9. По компоновке различают ДКС: с *встроенными* и *выносными* камерами смешения и зажигания.

10. По геометрии стенок различают ДКС: *гладкие*, *шероховатые* и *проницаемые*.

11. По наличию конструктивных элементов в рабочем канале различают ДКС: *без препятствий* (регуляторов поперечного сечения, экранов, специальных конструктивных элементов (для подачи и удаления газов, порошка и пр.) и с *наличием препятствий*.

12. По количеству камер для нагрева и ускорения порошка: *однокамерные* и *многокамерные ДКС*.

Схемы ДКС приведены на рисунке 1.

Прямые детонационные камеры сгорания с постоянным поперечным сечением

Конструкции данных камер выполняют цилиндрическими с диаметром менее 10÷15 мм, что связано с повышением теплотерь в их стенки. Такие ДКС часто выполняют со

встроенными камерами смешения топлива с окислителем и зажигания [3-6], а также ДКС для обеспечения возможности заполнения рабочего объема горючей смесью переменного состава по ее длине [7-10].

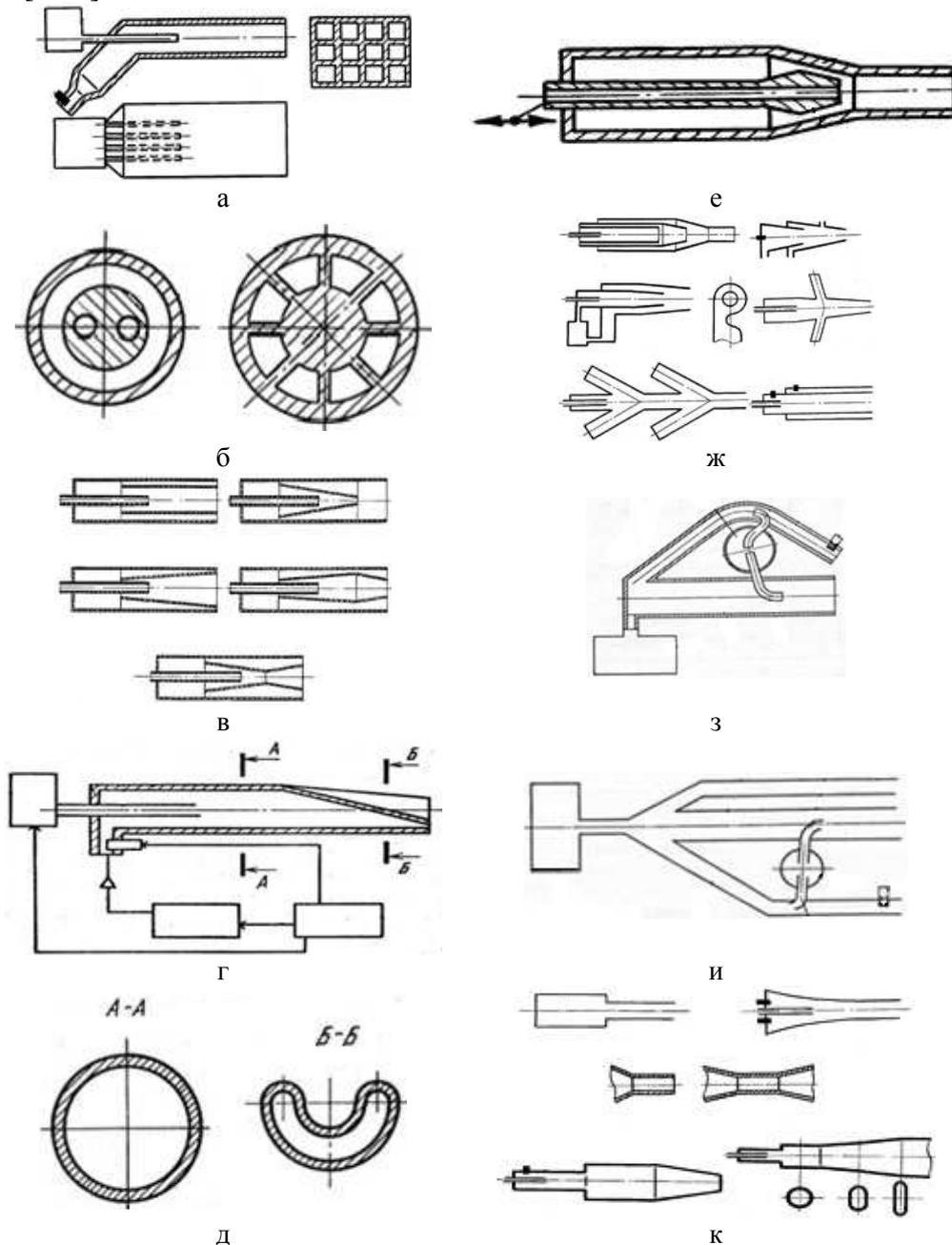


Рис. 1. Схемы детонационных камер сгорания: а – прямая многокамерная ДКС с прямоугольным сечением; б – кольцевое сечение прямой многокамерной ДКС; в – ДКС с экранами в рабочей камере; г – ДКС с начальной цилиндрической секцией и кольцевым выходным сектором; д – сечения начального и выходного сектора ДКС типа г; е – ДКС с регулируемым проходным сечением; ж – многосекционные ДКС; з – двухкамерная ДКС; и – трехкамерная ДКС; к – ДКС с изменяющимся по длине сечением

Многокамерные ДКС имеют несколько последовательно работающих детонационных каналов [11-14].

Можно применять ДКС с квадратным, прямоугольным, овальным и другими формами поперечного сечения (см. рис. 1,а,б), если это обосновано более рациональным использованием напыляемого порошка при обработке мелких деталей или локальных участков поверхностей. Использование продольных перегородок позволяет создавать ДКС с

увеличенными размерами поперечного сечения. Образующиеся продольные ячейки стабилизируют образование и распространение детонации, однако увеличивают потери энергии. Для нанесения покрытий на кольцевые поверхности относительно небольшого размера ДКС может быть выполнена с кольцевым сечением, которая также может быть разделена на продольные секции. В камеру сгорания ДКС могут вводиться различные экраны для управления формой, размерами и расположением исходного порошкового облачка (см. рис. 1,в).

Прямые детонационные камеры сгорания с переменным поперечным сечением

В работе [15] представлена ДКС, которая выполнена ступенчатой с уменьшающимся сечением по направлению истечения продуктов детонации. За счет возникновения отраженных волн на переходе ступеней увеличивается удельная энергия потока продуктов детонации, сокращается преддетонационное расстояние. Эти ступени (секции) ДКС могут сопрягаться плавными переходами. ДКС может быть выполнена телескопической [16, 17].

Для улучшения условий течения продуктов детонации со взвешенными частицами порошка разработаны ДКС с плавно уменьшающимся поперечным сечением (см. рис. 1,к), в т.ч. конические [18]. В таких ДКС достигается возможность получения пересжатых детонационных волн и усиление энергетического воздействия на частицы распыляемого порошка. Выходной участок ДКС может быть выполнен с постоянным сечением, а также в виде сопла, что позволяет дополнительно управлять скоростной, тепловой и химической релаксацией частиц порошка. При большом перепаде диаметров ступеней ДКС может иметь форму, напоминающую луковидную [19]. Особенно полезны подобные ДКС при использовании горючих газов – заменителей ацетилена. Для облегчения возникновения детонации и локализации исходного порошкового облачка в заданной зоне начальный участок ДКС выполнен с небольшой площадью поперечного сечения, переходящий резко или плавно в расширенный участок.

По технологическим условиям напыления покрытий в ряде случаев ДКС могут выполняться с плавно расширяющимся по направлению истечения продуктов детонации поперечным сечением [18].

В энергетике применяют ДКС с последовательными секциями расширения и сужения, которые могут быть использованы и в ДГУ для напыления покрытий. При использовании секций расширяющегося и сужающегося сечений (камер переменной геометрической формы, состоящих из последовательных секций расширения и сужения) обеспечивается режим многоступенчатой детонации [20, 21]. Сгорание горючей смеси происходит при более высоком давлении за счет распада детонационной волны на ударную волну и фронт горения в расширяющемся канале с последующим образованием детонации в сжатой среде.

Переход от осесимметричного сечения к симметричному относительно одной из осевых плоскостей обеспечивает не только формирование слоя покрытия соответствующей формы, но и дополнительную турбулизацию потока газозвеси и более ее лучшее перемешивание с продуктами сгорания, некоторое увеличение времени пребывания порошка в потоке продуктов сгорания и улучшение энергообмена между ними [18].

Для нанесения покрытий на кольцевые поверхности (торцовые и конические) выходная часть ДКС может быть выполнена с плавным переходом от круглой формы поперечного сечения в направлении открытого торца к форме кольцевого сектора [22]. При таком конструктивном исполнении устройства достигается преобразование импульсного гетерогенного потока, имеющего круглое поперечное сечение, в поток с формой поперечного сечения в виде кольцевого сектора, совпадающего по размерам с обрабатываемой кольцевой поверхностью. Уменьшение площади и формы поперечного сечения способствует формированию пересжатых детонационных волн. ДКС может быть выполнена цилиндрической с преобразованием круглой формы поперечного сечения на всей или части длины в форму кольцевого сектора (рис. 2). Напыляемый порошок фокусируется в кольцевом выходном секторе, что исключает его излишние затраты. Также ДКС может быть выполнена

на всей или части длины в форме конфузора, расширяющегося в направлении открытого торца, или конической – сужающейся.

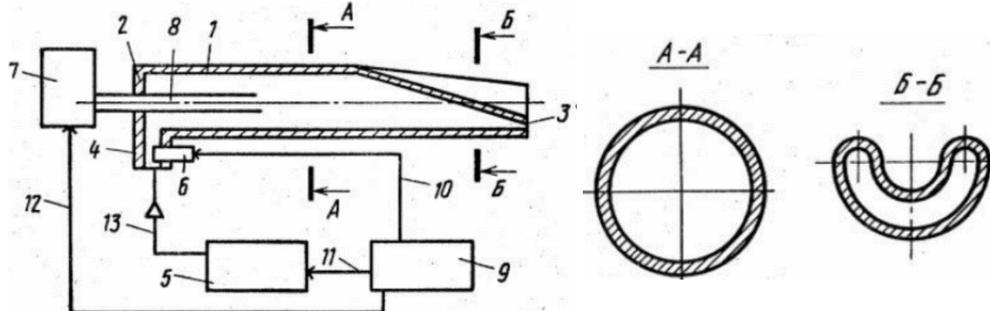


Рис. 2. Детонационная камера сгорания с начальной цилиндрической секцией: 1 – рабочая камера сгорания; 2 – закрытый торец; 3 – открытый торец; 4 – патрубок ввода газов в камеру у закрытого торца; 5 – системы подачи газов; 6 – воспламенитель горючей смеси; 7 – порошковый питатель; 8 – патрубок ввода порошка в рабочую полость; 9 – блок управления, соединенный цепями управления; 10 – блок управления с воспламенителем 6; 11 – блок управления с системой 5 подачи газов; 12 – блок управления с порошковым питателем 7

ДКС может быть выполнена с несимметричным поперечным сечением, которое сужается или расширяется к выходному срезу с одновременным изменением положений осей поперечного сечения. Это способствует дополнительной турбулизации газов во фронте горения, ускорению пламени и, соответственно, сокращению времени и расстояния перехода горения в детонацию. Возникающие пульсации газов в гетерогенном потоке увеличивают время пребывания частиц порошка в ДКС и интенсивности их нагрева.

ДКС с поворотами (изогнутые)

Конструктивные элементы ДКС в виде U-образных поворотов, витков и змеевиков [23,24] позволяют существенно сократить расстояние перехода горения в детонацию (ПГД) и уменьшить критическую интенсивность ударных волн для инициирования детонации, т.е. облегчают образование детонации. Эти исследования проводятся для создания воздушно-реактивных импульсных детонационных двигателей (ИДД) и высокоэффективных горелок сжигания топлива в детонационном режиме, однако представляют интерес при создании ДГУ для напыления покрытий. U-образные повороты способствуют фокусировке и усилению слабых ударных волн, образованных ускоряющимся пламенем. Однако такие повороты увеличивают гидравлическое сопротивление и осложняют периодическое заполнение каналов свежей горючей смесью.

Многокамерные ДКС

Многокамерные ДКС применяют как для получения пересжатых детонационных волн, так и для увеличения времени пребывания порошка в продуктах детонации для обеспечения соответствующего энергообмена и степени необходимых превращений в исходном материале. Описание подобных устройств представлено в [4, 25]. ДКС может быть выполнена из трех концентрично расположенных секций, причем выход охватываемой секции смещен по направлению движения потока продуктов детонации относительно выхода охватываемой секции. Охватываемые секции выполняются, как правило, с уменьшающимся по направлению истечения продуктов детонации поперечным сечением. Порошок вводится в центральную (начальную) секцию, в которой инициируется горение и детонация горючей смеси. При выходе горения на срез секции в охватываемой секции формируется два фронта горения (или детонации), один из которых продолжает двигаться к открытому торцу секции, а второй по кольцевому участку секции в обратном направлении, причем направления противоположны. Аналогичные явления имеют место при переходе горения в следующую секцию. Использование подобных конструкций ДКС с двумя и более секциями (см. рис. 1,3,и) позволяет обеспечивать необходимое время пребывания порошка в продуктах детонации для протекания нужных превращений, а также получение пересжатых волн детонации за счет

подпора основного потока продуктами детонации, истекающими из охватывающих секций. Для регулирования степени превращений в распыляемых порошках секции ствола могут заполняться различными видами горючих смесей, а порошок вводится непосредственно в выходную секцию ствола. Для завихрения двухфазного потока с целью интенсификации энергообмена порошка с продуктами детонации используют тангенциальное соединение секций.

Для получения пересжатых детонационных волн применяют также дополнительные секции в виде каналов, присоединенных к боковым стенкам основной камеры сгорания, а также дополнительные кольцевые секции, охватывающие камеру сгорания, в которой происходит обработка порошкового материала. Дополнительные секции способствуют получению пересжатых детонационных волн, увеличению длительности истечения продуктов детонации из ствола и соответствующей интенсификации процессов взаимодействия их с частицами порошка.

Двух- и трехкамерные ДКС обеспечивают возможность термического воздействия на обрабатываемую поверхность за счет дополнительных камер сгорания. Здесь применены разветвляющиеся секции камеры сгорания с общими системами подачи газов, инициирования детонации, а также возможна организация подачи порошка в основную (напылительную) камеру продуктами детонации.

Трехкамерная ДКС [25] имеет две параллельные прямые камеры сгорания, соединенные под прямым углом с выходной камерой изогнутой формы, открытый торец которой обращен в сторону внутренней поверхности изделий.

Выводы

1. Детонационные камеры сгорания являются важнейшими конструктивными элементами, определяющими технологические возможности детонационно-газовых установок для напыления покрытий и других операций.

2. Геометрическая форма и размеры камер сгорания оказывают существенное влияние на процессы формирования и параметры гетерогенных импульсных потоков и характеристики получаемых покрытий.

3. Рассмотренные в статье подходы могут быть распространены на камеры сгорания, используемые в других детонационно-газовых технологиях.

Список литературы

1. Kharlamov Yu.A. Gaseous pulse detonation spraying: current status, challenges, and future perspective // Intern. Thermal Spray Conference & Exposition ITSC 2008: Maastricht, The Netherlands, June 2-4, 2008. Conference Proceedings. – DVS – German Welding Society, 2008. – P. 159-166.
2. Харламов Ю.А., Полонский Л.Г. Газотермическое напыление. Современное состояние и перспективы развития // Вісник Східноукр. нац. университету імені В.Даля. – 2016. – №2(226). – С. 5-19.
3. Takuma Endo, Ryuji Kobayashi, Shimon Kuwajima, Yoko Seki, Woogyung Kim, Tomoyuki Johzaki. Detonation propagation from a cylindrical tube into a diverging cone // Journal of Thermal Science and Technology. 2020, vol. 15, no. 3, p. 20-00283.
4. Харламов Ю.А. Научные и технологические основы детонационно-газового напыления покрытий: автореф. ... докт. техн. наук. – Киев, 1994. – 35 с.
5. Бакланов Д.И., Голуб В.В., Иванов К.В., Кривокорытов М.С., Переход горения в детонацию в канале с диаметром меньше критического диаметра существования стационарной детонации // Теплофизика высоких температур. – 2012. – Т. 50, № 2. – С. 258-263.
6. Голуб В.В., Баженова Т.В., Бакланов Д.И., Иванов К.В., Кривокорытов М.С. Применение детонации водородо-воздушной смеси в устройствах для безыгольной инъекции // Теплофизика высоких температур. – 2013. – Т. 51, № 1. – С. 147-150.
7. Патент №1836161 РФ. Устройство для газотермического нанесения покрытий / В.М. Голубец, В.В. Кошевой, М.И. Пехньо, А.И. Цыхан. – Заявка №4768288/05 от 05.12.1989; опубл. 23.08.1993, Бюл. №31.
8. Патент №2399430 РФ. Установка для детонационного напыления покрытий / В.Ю. Ульяницкий, А.Л. Кириякин, А.А. Штерцер, С.Б. Злобин. – Заявка №2009105561/12 от 17.02.2009; опубл. 20.09.2010, Бюл. №26.
9. Патент №2176162 РФ. Лабиринтное устройство подачи газа и способ предотвращения обратной вспышки в детонационной пушке / А.В. Чернышев, Г.Ю. Барыкин. – Заявка №98114092/12 от 23.12.1996; опубл. 27.11.2001, Бюл. №33.

10. Патент №2201293 РФ. Устройство для самоподдержания детонации / А.В. Чернышев, Г.Ю. Барыкин, С.Н. Лакиза. – Заявка №98117840/12. от 12.24.1997; опубл. 27.03.2003, Бюл. №9.
11. Патент №2460591 РФ. Детонационный метатель / В.И. Кореньков, Ю.С. Попов. – Заявка № 2011112260/05 от 30.03.2011; опубл. 10.09.2012, Бюл. №25.
12. Патент №2070442 РФ. Пушка для детонационного напыления / С.О. Берлин, В.И. Кореньков, П.Ю. Пекшев, Ю.С. Попов, С.А. Шутов. – Заявка №5048839/26 от 23.06.1992; опубл. 20.12.1996, Бюл. №26.
13. Патент №2112603 РФ. Малогабаритный детонационный метатель / Вонг Чин Чунг, В.И. Кореньков, Б.А. Кустов, Г.Н. Макаров, Ю.С. Попов. – Заявка №96117311/25 от 28.08.1996; опубл. 10.06.1998, Бюл. №25.
14. Патент №2176162 РФ. Лабиринтное устройство подачи газа и способ предотвращения обратной вспышки в детонационной пушке / А.В. Чернышев, Г.Ю. Барыкин. – Заявка №98114092/12 от 23.12.1996; опубл. 27.11.2001, Бюл. №33.
15. Авторское свидетельство №513728 СССР. Устройство для детонационного напыления / Г.В. Самсонов, Б.Н. Двукраев, С.Ю. Шаривкер, Е.А. Астахов, А.П. Гарда, А.П. Эпик. – Заявка №2052197/05 от 02.08.1974; опубл. 15.05.1976, Бюл. №18.
16. Авторское свидетельство №1419737 СССР. Устройство для нанесения покрытий детонационным способом / А.А. Гончаров, Ю.П. Федько, Р.А. Амлинский, В.Е. Неделько, Э.З. Конторовский, В.В. Ежов. – Заявка №3315309/23-05 от 30.06.1981; опубл. 30.08.88, Бюл. №32.
17. Авторское свидетельство №1827872 СССР. Устройство для детонационного напыления покрытий / Г.Ю. Барыкин, А.В. Чернышов, В.Н. Коржик. – Заявка №4795772/05 от 19.12.1989; опубл. 27.03.1996, Бюл. №9.
18. Patent DE №3105 323 C2 Deutschland. Detonationsbeschichtung Vorrichtung / Y.A. Charlamov, V.I. Kalenov, V.L. Rjabosharko, Ju.I. Pisklov. – Anmeldetag 13.02.1981; offenlegungstag 02.09.1982.
19. Зверев А.И., Шаривкер С.Ю., Астахов Е.А. Детонационное напыление покрытий. – Л.: Судостроение, 1979. – 232 с.
20. Патент №147755 РФ. Устройство сжигания топлива в режиме многоступенчатой детонации / К.А. Звездин, В.В. Голуб, Д.И. Баланов, И.Н. Тарасенко, Д.А. Ленкевич, А.Л. Котельников, Г.Ю. Бивол. – Заявка №2012146388/06 от 31.10.2012; опубл. 20.11.2014, Бюл. №24.
21. Фролов С.М., Аксенов В.С. Иницирование газовой детонации в трубе с профилированным препятствием // Доклады Академии наук. – 2009. – Т. 427, № 3. – С. 344-347.
22. Авторское свидетельство №1728582 СССР. Импульсная камера сгорания / Ю.А. Харламов, А.И. Зверев, В.Н. Гольдфайн. – Заявка №4820353/06 от 25.04.1990; опубл. 23.04.1992, Бюл. №15.
23. Фролов С.М., Аксенов В.С., Шамшин И.О. Распространение ударных волн и детонации в каналах с U-образными поворотами предельной кривизны // Химическая физика. – 2008. – Т. 27, № 10. – С. 5-21.
24. Патент №2350403 РФ. Устройство для детонационного напыления внутренних поверхностей деталей / Л.Ф. Мелехин, А.В. Люханов, М.А. Филатов. – Заявка №2007129292/11 от 30.07.2007; опубл. 27.03.2009, Бюл. №9.
25. Патент №2036022 РФ. Устройство для детонационного нанесения покрытий на внутреннюю поверхность изделий / В.А. Яковлев, А.Г. Погорилый, Ю.А. Вольвач. – Заявка №5041014/05 от 28.05.1992; опубл. 27.05.1995, Бюл. №18.

References

1. Kharlamov Yu.A. Gaseous pulse detonation spraying: current status, challenges, and future perspective // Intern. Thermal Spray Conference & Exposition ITSC 2008: Maastricht, The Netherlands, June 2-4, 2008. Conference Proceedings. – DVS – German Welding Society, 2008. – P. 159-166.
2. Kharlamov Yu.A., Polonsky L.G. Gas thermal spraying. Current state and prospects of development // News of Shidnoukr. nat. university n.a. V. Dal. 2016, no. 2(226), pp.5-19.
3. Takuma Endo, Ryuji Kobayashi, Shimon Kuwajima, Yoko Seki, Wookyung Kim, Tomoyuki Johzaki. Detonation propagation from a cylindrical tube into a diverging cone // Journal of Thermal Science and Technology. 2020, vol. 15, no. 3, p. 20-00283.
4. Kharlamov Yu.A. Scientific and technological bases of detonation-gas spraying of coatings: abstract ... doct. of tech. sc. – Kiev, 1994. – 35 p.
5. Baklanov D.I., Golub V.V., Ivanov K.V., Krivokorytov M.S., Gorenje transition to detonation in a channel with a diameter less than the critical diameter of the existence of stationary detonation // Thermophysics of high temperatures. 2010, vol. 50, No. 2, pp. 258-263.
6. Golub V.V., Bazhenova T.V., Baklanov D.I., Ivanov K.V., Krivokorytov M.S. Using of hydrogen-air mixture detonation in needle-free injection devices // Thermophysics of high temperatures. 2013, vol. 51, no. 1, pp. 147-150.
7. Patent No. 1836161 RU. Device for gas-thermal coating / B.M. Golubets, V.V. Koshevoy, M.I. Pekhno, A.I. Tsyhan. – Appl. No. 4768288/05 form 05.12.1989; publ. 23.08.1993, Bul. No. 31.
8. Patent No. 2399430 RU. Installation for detonation spraying of coatings / V.Yu. Ulyanitsky, A.L. Kiryakin, A.A. Shterzer, S.B. Zlobin. – Appl. No. 2009105561/12 from 17.02.2009; publ. 20.09.2010, Bul. No. 26.
9. Patent No. 2176162 RU. Labyrinth gas supply device and a way to prevent a reverse flash in a detonation gun / A.V. Chernyshev, G.Yu. Barykin. – Appl. No. 98114092/12 from 23.12.1996; publ. 27.11.2001, Bul. No. 33.

10. Patent No. 2201293 RU. Device for self-sustaining detonation / A.V. Chernyshev, G.Yu. Barykin, S.N. Lakiza. – Appl. No. 98117840/12. dated 12.24.1997; publ. 27.03.2003.
11. Patent No. 2460591 RU. Detonation thrower / V.I. Korenkov, Yu.S. Popov. –Appl. No. 2011112260/05 from 30.03.2011; publ. 10.09.2012, Bul. No. 25.
12. Patent No. 2070442 RU. Cannon for detonation spraying / S.O. Berlin, V.I. Korenkov, P.Yu. Pekshev, Yu.S. Popov, S.A. Shutov. – Appl. No. 5048839/26 from 23.06.2002; publ. 20.12.1996, Bul. No. 26.
13. Patent No. 2112603 RU. Small-sized detonation thrower / Wong Chin Chung, V.I. Korenkov, B.A. Kustov, G.N. Makarov, Yu.S. Popov. – Appl. No. 96117311/25 from 28.08.1996; publ. 10.06.1998, Bul. No. 25.
14. Patent No. 2176162 RU. Labyrinth gas supply device and a way to prevent a reverse flash in a detonation gun / A.V. Chernyshev, G.Yu. Barykin. – Appl. No. 98114092/12 from 23.12.1996; publ. 27.11.2001, Bul. No. 33.
15. Author's Certificate No. 513728 USSR. Device for detonation spraying / G.V. Samsonov, B.N. Dvukraev, S.Yu. Sharivker, E.A. Astakhov, A.P. Garda, A.P. Epik. – Appl. No. 2052197/05 from 02.08.1974; publ. 15.05.1976, Bul. No. 18.
16. Author's Certificate No. 1419737 USSR. Device for coating by detonation method / A.A. Goncharov, Yu.P. Fedko, R.A. Amlinsky, V.E. Nedelko, E.Z. Kontorovsky, V.V. Ezhov. – Appl. No. 3315309/23-05; dated 30.06.1981; publ. 30.08.88, Bul. No. 32.
17. Author's Certificate No. 1827872 USSR. Device for detonation spraying of coatings / G.Yu. Barykin, A.V. Chernyshov, V.N. Korzhik.– Appl. No. 4795772/05 from 19.12.1989; publ. 27.03.1996, Byul. No. 9.
18. Patent DE №3105 323 C2 Germany. Detonation coating device / Y.A. Charlamov, V.I. Kalenov, B.L. Rjaboshapko, Ju.I. Pisklov. – Filing date 13.02.1981; Disclosure date 02.09.1982.
19. Zverev A.I., Sharivker S.Yu., Astakhov E.A. Detonation spraying of coatings. – L.: Shipbuilding, 1979. – 232 p.
20. Patent No. 147755 RU. Fuel combustion device in multistage detonation mode / K.A. Zvezdin V.V. Golub, D.I. Balanov, I.N. Tarasenko, D.A. Lenkevich, A.L. Kotelnikov, G.Y. Bivol. – Appl. No. 2012146388/06 from 31.10.2012; publ. 20.11.2014, Bul. No. 24.
21. Frolov S.M., Aksenov V.S. Initiation of gas detonation in a pipe with a profiled obstacle // Reports of the Academy of Sciences. 2009, vol. 427, no. 3, pp. 344-347.
22. Author's Certificate No. 1728582 USSR. Pulsed combustion chamber / Yu.A. Kharlamov, A.I. Zverev, V.N. Goldfine. – Appl. No. 4820353/06 from 25.04.1990; publ. 23.04.1992, Bul. No. 15.
23. Frolov S.M., Aksenov V.S., Shamshin I.O. Propagation of shock waves and detonation in channels with U-shaped turns of extreme curvature // Chemical Physics. 2008, vol. 27, no. 10, pp. 5-21.
24. Patent No. 2350403 RU. Device for detonation spraying of internal surfaces of parts / L.F. Melekhin, A.V. Lyukhanov, M.A. Filatov. – Appl. No. 2007129292/11 from 30.07.2007; publ. 27.03.2009, Bul. No. 9.
25. Patent No. 2036022 RU. Device for detonation coating on the inner surface of products / V.A. Yakovlev, A.G. Pogorily, Yu.A. Volvach. – Appl. No. 5041014/05 from 28.05.1992; publ. 27.05.1995, Bul. No. 18.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Харламов Юрий Алексеевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Машины металлургического комплекса»	Kharlamov Yuri Alekseevich – doctor of technical sciences, professor, professor of the Department "Machines of the metallurgical complex"
Вишневецкий Дмитрий Александрович – доктор технических наук, доцент, ректор	Vishnevsky Dmitry Aleksandrovich – doctor of technical sciences, associate professor, rector
Петров Павел Александрович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Машины металлургического комплекса»	Petrov Pavel Aleksandrovich – candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the Department "Machines of the metallurgical complex"
Жильцов Александр Павлович – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры металлургического оборудования	Zhiltsov Alexander Pavlovich – candidate of technical sciences, associate professor, professor of the Department of metallurgical equipment,
Харитоненко Анатолий Анатольевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры металлургического оборудования	Kharitonenko Anatoly Anatolyevich – candidate of physical and mathematical sciences, associate professor of the Department of metallurgical equipment
Бочаров Александр Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры металлургического оборудования akhariton@gmail.com	Bocharov Alexander Viktorovich – candidate of technical sciences, associate professor of the Department of metallurgical equipment

Получена 31.08.2023