

УДК 621.793.79

*д.т.н., проф. Харламов Ю. А.,
д.т.н., доц. Вишневский Д. А.,
к.т.н., доц. Петров П. А.,
Орлов А. А.
(ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР)*

ИМПУЛЬСНЫЕ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ДЛЯ НАПЫЛЕНИЯ ПОКРЫТИЙ

Статья посвящена систематизации и сравнительному анализу конструкций и элементов импульсных камер сгорания (ИКС), используемых в установках для детонационно-газового напыления покрытий с целью последующей разработки рекомендаций по их конструированию. Описаны четыре основные стадии рабочего цикла детонационно-газового напыления покрытий. Сформулированы основные требования к импульсным камерам сгорания. Предложена классификация импульсных камер детонационного сгорания. Подробно рассмотрены конструктивные особенности прямых камер сгорания с постоянным поперечным сечением. Сформулированы основные требования к импульсным камерам сгорания для надлежащего обеспечения технологии детонационно-газового напыления покрытий. Описана роль микрогеометрии внутренних поверхностей ИКС. Материалы ИКС. Рассмотрены варианты выполнения закрытой (входной) и открытой (выходной) частей ИКС. Показано, что рабочим циклом детонационно-газового напыления покрытий можно управлять применением дополнительных конструктивных элементов в рабочей полости ИКС и завихрителей. Рассмотрена роль пространственного положения ИКС в детонационно-газовых установках.

Ключевые слова: газотермическое напыление, газотермические покрытия, горючие газы, детонационно-газовое напыление, импульсная камера сгорания, порошки, продукты детонации, преддетонационное расстояние.

Введение. В развитии технологий современного машиностроения большую роль играют методы инженерии поверхности. В высокотехнологичных отраслях промышленности находит все более широкое применение газотермическое напыление защитных и функциональных покрытий (ГТП). Непрерывно совершенствуются способы газопламенного, плазменного и электродугового напыления, а также разрабатываются новые, например, высокоскоростное газопламенное, холодное газодинамическое напыления и др. Первым высокоскоростным методом ГТП, обеспечившим резкое улучшение свойств газотермических покрытий (ГТП), было детонационно-газовое напыление, разработанное в конце 1950-х в США, а в 1970-е годы самостоятельно начавшее развиваться в СССР [1, 2]. В эти же годы разрабатывались первые детонационно-газовые установки (ДГУ) [3], а на основе результатов их эксплуатации начали совер-

шенствоваться концепции их развития [4]. К настоящему времени разработано достаточно много схем и конструкций ДГУ и их отдельных узлов. Это требует систематизации и сравнительного анализа этих вариантов для выбора оптимальных решений при разработке новых и совершенствовании существующих ДГУ. К основным компонентам ДГУ, оказывающим определяющее влияние на процесс напыления, является импульсная камера сгорания (ИКС), где организуется регулярное импульсное (пульсирующее) сжигание газовой смеси, нагрев и ускорение частиц порошка, формирующих напылительную струю.

Целью данной статьи является систематизация и сравнительный анализ конструкций и элементов импульсных камер сгорания, используемых в установках для детонационно-газового напыления покрытий, и разработка рекомендаций по их проектированию.

Основные требования к импульсным камерам сгорания (ИКС). Единичный рабочий цикл детонационно-газового напыления включает в себя четыре основные стадии:

1. Полное или частичное заполнение объёма ИКС подготовленной свежей горючей смесью с требуемым по технологическим условиям содержанием топлива и окислителя с одновременной или последующей подачей в определенную зону камеры порции порошка напыляемого материала.

2. Инициирование и возбуждение в ИКС детонационного режима выгорания подготовленной горючей смеси.

3. Выхлоп через открытый конец ИКС продуктов детонации, сопровождающийся нагревом, ускорением частиц порошка и осаждением их на поверхность изделия, распложенного на заданном расстоянии — дистанции напыления.

4. Вытеснение из объёма камеры смеси остаточных продуктов сгорания и воздуха и заполнение его свежей подготовленной горючей смесью.

Эффективное осуществление процесса детонационно-газового напыления и формирования высококачественных покрытий требует соблюдения ряда условий: строгого поддержания состава и степени заполнения ИКС горючей смесью; точного дозирования и подачи порошка в оптимальную по технологическим условиям зону ИКС; обеспечения инициирования детонации вблизи закрытого торца ИКС или короткого преддетонационного расстояния; максимально возможного эффективного использования энергии потока продуктов детонации в процессе напыления; высокой частоты повторения циклов напыления и пр. Конструкция ИКС должна обеспечить: минимальные рабочий объем ИКС и расход газов; исключение преждевременного воспламенения горючей смеси от горячих стенок ИКС и контакта с остаточными продуктами сгорания; надежную локализацию детонации в рабочем объеме ИКС; надежную работу систем подачи газов и порошка и др.

Классификация импульсных камер сгорания:

1. По выполняемым функциям в составе ДГУ различают: *основные* и *вспомогательные* ИКС. Основные ИКС предназначены для выполнения основного назначения — формирования напылительного гетерогенного потока при нагреве и ускорении частиц порошка. Вспомогательные ИКС 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 ИКС, работающие на: газообразном, жидком или комбинированном (газовом и жидком) топливе.

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

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

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

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

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

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

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

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

11. По наличию конструктивных элементов в рабочем канале различают ИКС: *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* ИКС.

При конструировании ИКС должны учитываться скорострельность ДГУ, предпочтительный состав горючей смеси, ее объем, геометрия и размеры, в значительной мере определяющие технологические возможности ДГУ. Кроме того, конструктивные особенности ИКС в значительной мере определяют режим выгорания свежего заряда горючей смеси: преддетонационный, детонация Чемпена — Жуге или пересжатая детонация.

Геометрия и размеры ИКС. При выборе геометрии и размеров ИКС необходимо учитывать две группы факторов: требуемые технологические характеристики ДГУ (напыляемые материалы и гранулометрический состав напыляемых порошков, производительность по расходу напыляемого порошка или скорости формирования покрытий, возможные составы детонирующих смесей газов, оптимальные геометрия и размеры пятна напыления, скорострельность, требуемые значения скорости и температуры напыляемых частиц и пр.) и физические ограничения, связанные с реализацией детонационного горения используемых горючих смесей.

Из технологических факторов прежде всего следует учитывать требуемые форму и размеры пятна напыления, формируемого при единичных рабочих циклах напыления. Они должны учитывать размеры обрабатываемых поверхностей и термические циклы напыляемых деталей. При напылении мелких деталей и узких поверхностей размеры пятна напыления должны исключать неэффективный расход напыляемого порошка и осаждение его на смежные поверхности.

Напылительная струя должна взаимодействовать только с поверхностными зонами детали, на которых должны формироваться покрытия. Напылительные струи с небольшими размерами поперечного сечения могут использоваться также при нанесении дискретных (неплошных) покрытий. Форма и размеры поперечного сечения напылительной струи, а следовательно, пятна напыления, определяются в основном конструктивными параметрами выходной части ствола.

Скорострельность в совокупности с поперечным сечением ИКС и массой единичной зоны порошка определяют термический цикл формируемого покрытия и детали. Масса единичной дозы порошка и его гранулометрический состав влияют на выбор длины и объема ИКС, их значения находятся в прямой зависимости.

Физические факторы, влияющие на проектирование ИКС, связаны с закономерностями развития и протекания детонационного горения используемых горючих смесей. Детонационному горению посвящено большое число работ [5], однако до сих пор остаются спорными вопросы о температуре во фронте волны и в зоне химических реакций, поведении волны в зависимости от размеров и геометрии каналов камеры сгорания, а также о влиянии на детонацию турбулентности и завихренности потока. Детонационный фронт имеет мелкомасштабную ячеистую структуру, вызванную неустойчивостью процесса горения. Размеры ячейки пропорциональны периоду индукции смеси и являются характеристикой ее состава. Знание размеров ячейки очень важно с практической точки зрения, так как позволяет определить критический диаметр детонационной камеры сгорания, при которой детонационная волна распространяться не будет. Поэтому конструирование ИКС должно проводиться с учетом используемых видов топлива. Из горючих газов при детонационно-газовом напылении наиболее часто применяют ацетилен и пропан-бутан, получает

распространение метилацетилен-алленовая фракция (МАФ) [6]. Применяют также смеси горючих газов, в том числе водорода, а также добавки инертных газов. Детонация смесей этих газов с кислородом характеризуется различными параметрами детонации: скоростью детонационной волны, температурой за фронтом детонации, значением динамического напора, теплофизическими и химическими свойствами продуктов детонации и др. Эти параметры, наряду со свойствами напыляемых порошков, определяют необходимые пути разгона и нагрева частиц порошка и, соответственно, длину ИКС.

На начальном этапе развития детонационно-газового напыления в ДГУ применяли прямые ИКС, обычно круглого сечения, их характерные размеры по данным работ [3, 4] приведены в таблице 1.

Ограничения по использованию ИКС диаметром менее 10÷15 мм связаны с повышением теплотерь в их стенки и, соответственно, неблагоприятным влиянием на режимы детонации. Однако в последнее время показана возможность использования форкамер для осуществления перехода горения в детонацию в субкритических каналах и оптимизации расхода горючего в импульсном и частотном детонационных режимах. Практически показана возможность получения детонации в водородно-

кислородной стехиометрической смеси при атмосферном давлении в трубках диаметром 1, 1,5 и 2 мм на расстоянии 120÷150 калибров [7]. Это открывает возможность создания портативных устройств для микродетонационного напыления покрытий.

Длина ствола должна быть не менее преддетонационного расстояния (для смеси ацетилена с кислородом эта величина по некоторым данным равна диаметру ствола) и достаточно большой, чтобы обеспечить ускорение частиц пор в стволе.

Преддетонационное расстояние зависит от ряда факторов: состава горючей смеси и ее начального давления, диаметра труб и их шероховатости, места инициирования горения — у открытого или закрытого конца трубы или в средней части трубы, мощности источника поджога и др.

В мелкосерийном производстве при многообразии используемых порошков и горючих смесей может потребоваться применение ИКС (стволов) с различной длиной. В этом случае используют сменные стволы различной длины или составные из нескольких последовательно соединенных секций. По а. с. СССР № 1419737 предложены конструкции телескопических стволов из двух ступеней разного диаметра, причем ступень с закрытым концом имеет меньший диаметр.

Таблица 1

Размеры импульсных камер сгорания в ДГУ для напыления покрытий [3, 4]

Тип ДГУ	Длина ДКС, м	Внутренний диаметр ДКС, мм	Скорострельность, Гц
D-Gun	1	25	4÷8
ИПМ, Украина	2	22	1÷6
АДК-1М	1,85	16÷25	1÷5
Корунд	1,2	26	2÷4
Обь	1,25	25	4÷6
Aachen University, Germany	2	25	4÷6
Перун Р	0,6; 1,1	21	3,3; 6,6
HFPD	0,25÷0,9	15÷20	45÷75
Комплекс детонационного напыления Plakart D-3	до 1,2	20 (16÷25)	4 (2÷10)
Hiroshima University, Japan	0,35÷0,65	10	150

Обычно в ДГУ используют стволы с круглым сечением. Однако можно применять ДКС с квадратной (а. с. СССР № 438215), прямоугольной, овальной и другими формами поперечного сечения, если это обосновано более рациональным использованием напыляемого порошка при обработке мелких деталей или локальных участков поверхностей. Возможность напыления покрытий из ДКС квадратного сечения размерами 14×14 и 20×20 мм экспериментально подтверждена автором в работе [8].

Схема ИКС с прямоугольным сечением (а. с. СССР № 638845) показана на рисунке 1, *а*. В выходную часть 1 прямоугольного сечения вводится несколько сопел 2 порошкового питателя 3. Входная часть 4 ИКС выполнена сужающейся, на входе смонтирован воспламенитель 5. Использование ИКС с продольными перегородками

(а. с. СССР № 736436) позволяет создавать ИКС с увеличенными размерами поперечного сечения (рис. 1, *б*). Образующиеся продольные ячейки стабилизируют образование и распространение детонации, однако увеличивают потери энергии.

Для нанесения покрытий на кольцевые поверхности относительно небольшого размера ствол может быть выполнен с кольцевым сечением (рис. 2, *а*). В этом случае в цилиндрической камере сгорания 1 размещается соосно цилиндрический сердечник 2 с каналами 3 для охлаждающей жидкости. Для стабилизации необходимых режимов горения кольцевая камера сгорания может быть разделена на продольные секции (рис. 2, *б*). Используя этот принцип, можно наносить покрытия и на другие виды периметральных участков поверхностей.

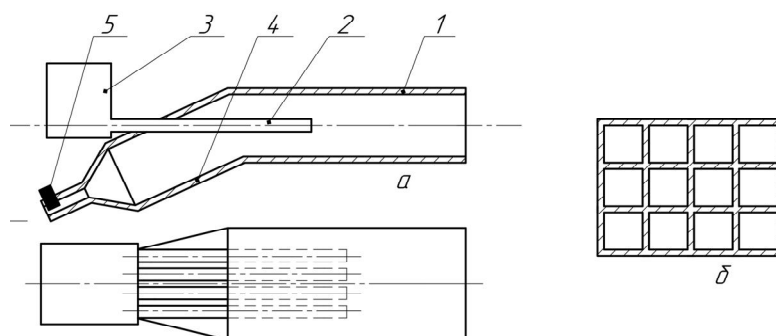


Рисунок 1 ИКС (стволы) прямоугольного сечения

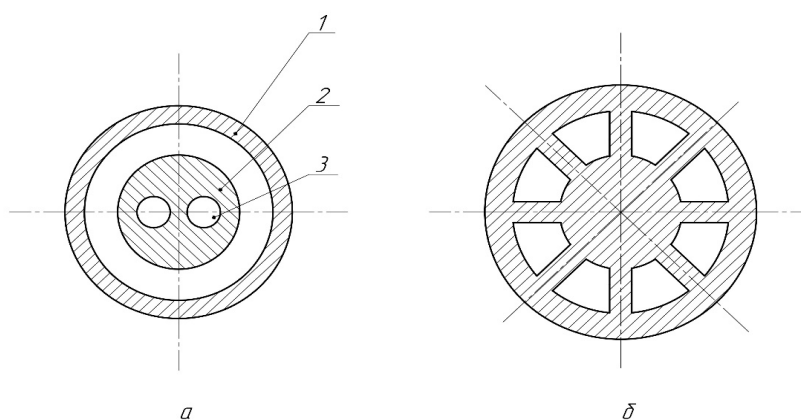


Рисунок 2 Стволы с кольцевым сечением

Микрогеометрия внутренних поверхностей ИКС. Внутренние поверхности камеры сгорания могут быть гладкими и шероховатыми. В шероховатой трубе скорость детонации теряет свойство физико-химической константы смеси и зависит от аппаратурных условий — от степени шероховатости. Чем больше шероховатость, тем сильнее падает скорость [9]. Это явление может быть использовано для регулирования динамического и теплового взаимодействия частиц порошка с продуктами детонации. Интенсивная турбулентность, вызываемая шероховатостью, может способствовать не только интенсификации теплообмена, но и более равномерному перемешиванию порошка с продуктами сгорания. Вместо обычно используемых проволочных спиралей лучше использовать нарезные канавки различного профиля в стенках ствола. Канавки могут быть выполнены по всей длине ствола или на отдельных его участках (а. с. СССР № 946060 и 959326). Канавки могут быть кольцевыми или винтовыми. При расположении канавок на входном участке ствола сокращается преддетонационное расстояние, а при расположении их на выходе из ствола достигается улучшение перемешивания порошка и интенсификация теплообмена.

Материалы ИКС. Обычно детонационные камеры сгорания изготавливают из нержавеющей сталей. Технологичность их конструкций обеспечивается применением холоднокатаных труб. Эти материалы имеют достаточную стойкость внутренних поверхностей ИКС к воздействию детонационной волны и продуктов детонации, а также стойкость наружных поверхностей к воздействию охлаждающих сред. Однако до настоящего времени при конструировании ДГУ не учитывается роль теплоотдачи от продуктов сгорания на стенки камеры из-за высоких температур в детонационной волне и потоке продуктов детонации. Наиболее теплонагруженной является выходная часть ИКС. Понижение теплопроводности стенок ИКС будет способствовать

более эффективному полезному использованию энергии детонирующей смеси газов и снижению потерь для охлаждения. Поэтому целесообразен поиск материалов с пониженной теплопроводностью или применение термобарьерных покрытий на внутренних поверхностях камеры сгорания.

Закрытая (входная) часть ИКС. Детонационные (импульсные) камеры сгорания ДГУ являются полуоткрытыми, один из концов условно можно считать закрытым, а другой — открытым. Обычно у закрытого конца ИКС соединена с системами подачи горючей смеси и иницирования горения. Открытый торец предназначен для выхлопа продуктов газовой детонации со взвешенными частицами напыляемого порошка. В первых промышленных ДГУ к закрытому торцу присоединялись системы ввода порошка в ИКС. В настоящее время развиваются ДГУ с различным расположением зон ввода в ИКС горючих смесей и порошка, в том числе вблизи открытого торца или в средней части.

В наиболее простых конструкциях ДГУ часть ИКС, прилегающая к закрытому торцу, играет роль камер смешения газов и зажигания, а также соосного сопла для ввода порошка. В более совершенных конструкциях ДГУ камеры смешения газов и зажигания выполняются отдельными или совмещенными боками. Прямые ИКС часто выполняют со встроенными камерами смешения топлива с окислителем и зажигания. В качестве примера можно привести ДГУ по а. с. СССР № 1603582; 1716253; 1827872 и патентам РФ № 1836161; 2176162; 2201293; 2399430.

В ДГУ по патенту РФ № 1603582 смешительная камера соединена с ИКС посредством пластинчатого лепесткового обратного клапана, а камера зажигания совмещена с начальным участком ИКС. При выгорании заполненной камеры клапан запирает подачу свежей горючей смеси и препятствует попаданию продуктов детонации в смешительную камеру. Подобные клапаны находят применение в пульсирующих детонационных двигателях, прин-

цип действия которых близок к ДГУ [10]. Испытания модельной пульсирующей камеры продемонстрировали её хорошую работоспособность, простоту конструкции и эксплуатации лепесткового обратного клапана, выполненного из тонкой нагартованной жаропрочной нержавеющей стали толщиной 0,2 мм, однако он имеет малый ресурс работы (30÷160 с).

Наличие эффективных камер смешения и зажигания, обеспечивающих качественное перемешивание газов — компонентов горючей смеси, способствует формированию детонационной волны вблизи закрытого конца ИКС [11]. Результатом является значительное уменьшение длины преддетонационного участка и ИКС в целом. Уменьшение габаритов и массы ДГУ дает возможность создания роботизированных участков детонационно-газового напыления.

При использовании горючих смесей с медленным переходом горения в детонацию в концевой части ИКС применяют специальные устройства для ввода перемешанных газов. В ИКС по а. с. СССР № 1818149 его выполняют в виде пространственной решетки перемычек и проходов, поперечные размеры которых составляют 0,5÷2,0 размера ячейки стационарной детонационной волны. Размер ячейки во фронте стационарной детонации для стехиометрической смеси природного газа с кислородом составляет 4 мм, а для пропан-бутана — от 6 до 1,5 мм. Пространственная решетка выполнена расходящейся к открытому концу ИКС с углом расхождения не более 80° (рис. 3). Такие устройства позволяют сократить преддетонационные расстояния в горючих смесях на основе трудндетонируемых горючих газов в десять и более раз, вплоть до сопоставимых с размерами поперечного сечения ИКС. Объем ИКС может быть сокращен в два и более раз.

По патенту РФ № 2129474 закрытый торец ИКС предлагается снабжать обратным клапаном, обеспечивающим доступ атмо-

сферного воздуха при разрезении после истечения продуктов детонации и продувку камеры. Однако инерционность обратных клапанов делает сомнительным организацию продувки со стороны закрытого торца ИКС.

Открытая (выходная) часть ИКС. Выходная часть ИКС вблизи открытого конца выполняет роль сопла для истечения продуктов детонации со взвешенными частицами напыляемого порошка. Форма и размеры выходного сечения сопла в основном определяют форму и размеры поперечного сечения напылительной струи и формируемых единичных пятен напыляемых покрытий. Турбулизация напылительной струи и взаимодействие ее с окружающей средой могут приводить к изменению распределения части порошка в струе и, соответственно, единичных пятен напыления.

Обычно в ИКС для напыления покрытий используются нормальные сопла, расположенные перпендикулярно оси ИКС, и, по сути, являются выходной частью их без изменения поперечного сечения. Могут применяться выходные сопла ИКС как с сужающимся, так и расширяющимся сечением. По а. с. СССР № 551053 выходное сопло ИКС выполнено с возможностью изменения проходного сечения. Однако, с учетом инерционности напыляемых частиц порошка, сужение должно быть незначительным с расчетом траектории их движения в сужающихся каналах. В последнее время начинают применять сопла с косым срезом, плоскость выходного сечения которых расположена под углом к оси ИКС, например, в ДГУ по патенту РФ № 2506342 (рис. 4).

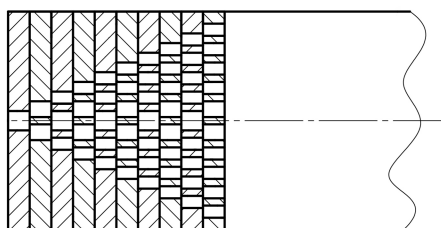
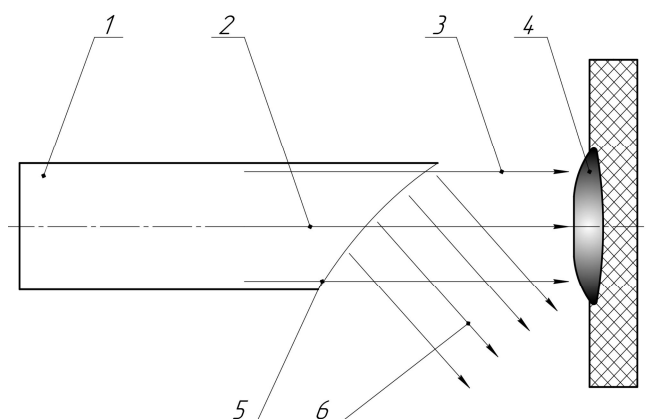
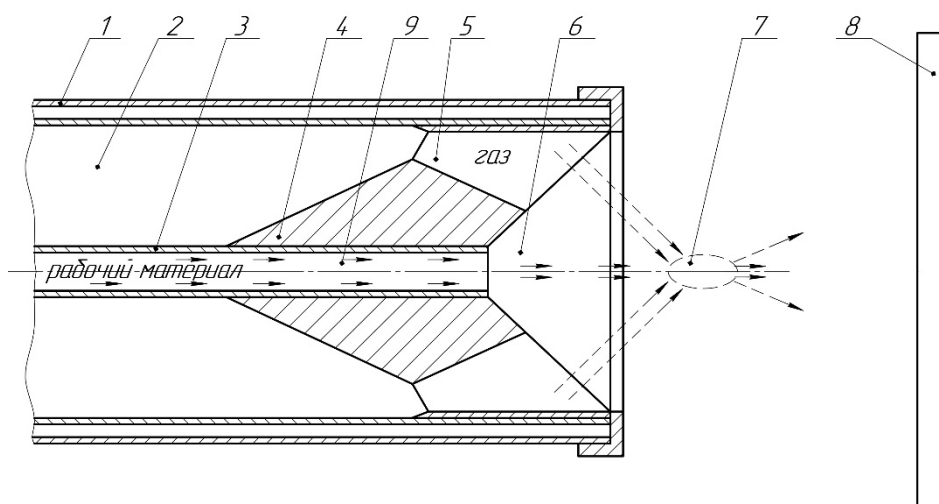


Рисунок 3 ИКС с устройством ускорения перехода горения в детонацию



1 — рабочая полость ИКС; 2 — направление течения потока продуктов детонации с взвешенными частицами порошка в рабочей полости ИКС; 3 — направление перемещения частиц порошка в сторону напыляемой поверхности; 4, 5 — косой срез выходного конца ИКС; 6 — направление истечения продуктов детонации из ИКС с косым срезом выходного конца

Рисунок 4 Отклонение ударных волн и продуктов детонации при течении между срезом ИКС и напыляемой поверхностью



1 — импульсная камера сгорания (ИКС); 2 — рабочая полость ИКС; 3 — трубка для подачи напыляемого порошка; 4 — сопловой конус; 5 — сопловой канал; 6 — зона разрежения; 7 — зона схождения струй продуктов газовой детонации; 8 — напыляемое изделие; 9 — направление подачи напыляемого порошка

Рисунок 5 Импульсная камера сгорания с выходной сопловой решеткой

Падение давления со стороны косого среза ИКС вызывает отклонение ударной волны, формирующейся при выходе детонационной волны в окружающую среду, и сопутствующей импульсной струи продуктов детонации. Более инерционные частицы порошка практически не изменяют своей траектории движения. Благодаря этому уменьшается термомеханическое воздей-

ствие газовой составляющей импульсной напылительной струи на напыляемое изделие. Ослабляется также воздействие отраженной волны от напыляемой поверхности на частицы напыляемого порошка.

В ИКС по патенту РФ № 2160640 в выходной части используется сопловая решетка для истечения продуктов газовой детонации (рис. 5), выполненная кониче-

ской с вершиной, направленной к выходу из рабочей полости. Сопла, расположенные по окружности, выполнены с косым срезом, обеспечивают истечение отдельных струй продуктов газовой детонации в фокус на оси камеры. При этом образуется зона разрежения, в которую через осевую трубку подается напыляемый порошок. Это позволяет получать пятна напыления с размерами меньше размеров поперечного сечения ИКС. Авторы использовали данную ИКС при напылении эпоксидных порошков и установили оптимальную величину конуса $60\div 90^\circ$.

Конструктивные элементы в рабочей полости ИКС. В ряде ДГУ используют различные конструктивные элементы, размещаемые в рабочей полости ИКС с определенными целями. Для облегчения перехода горения в детонацию труднодетонируемых смесей применяют различные препятствия [12]. В близких по принципу действия пульсирующих детонационных двигателях и импульсно-детонационных газовых горелках применяют осесимметричные препятствия специальной формы (сопла) или набор препятствий с различным коэффициентом «блокировки» сечения камеры и различной формы, которые изменяются с расстоянием от источника зажигания таким образом, чтобы обеспечить оптимальное согласование темпа ускорения турбулентного фронта пламени и темпа усиления образовавшейся ударной волны для осуществления перехода горения в детонацию (патент РФ № 2176162). По патенту Украины № 14707 в ИКС располагается сосновый шнек, выполненный из нескольких секций с разным числом заходов и переменным шагом витков, уменьшающимися от секции к секции в направлении выходного сопла. Это способствует турбулизации потока горючей смеси и пламени и ускорению перехода горения в детонацию. По-видимому, подобный шнек может быть размещен на соплах при осевом вводе порошка со стороны закрытого торца ИКС.

Вставки в камерах сгорания могут быть использованы для получения выгорания горючих смесей в режиме пересжатой детонации, обеспечивающих более интенсивное ускорение напыляемых частиц порошка. В цилиндрических ИКС конические вставки могут уменьшить площадь поперечного сечения рабочей камеры сгорания при получении кольцевых пятен напыления. В ИКС прямоугольного сечения могут быть использованы клиновидные вставки.

В рабочую камеру ИКС могут вводиться различные экраны (а. с. СССР № 690837).

На рисунке 6, а показана конструкция ИКС с цилиндрическим экраном в выходной части. Трубка подачи порошка входит в объем ДКС, ограниченный экраном по сечению потока. Придавая экрану различную форму, как, например, на рисунке 6, б–д, можно управлять формой и размерами исходного порошкового облачка в рабочем канале, условиями газообмена при его наполнении свежей горючей смесью, а также условиями формирования и истечения импульсной двухфазной струи. За счет этого при выхлопе импульсной двухфазной струи обеспечивается ее экранизация от окружающей среды кольцевым потоком продуктов детонации. Этим достигается также более высокая однородность температуры и скорости частиц по сечению потока.

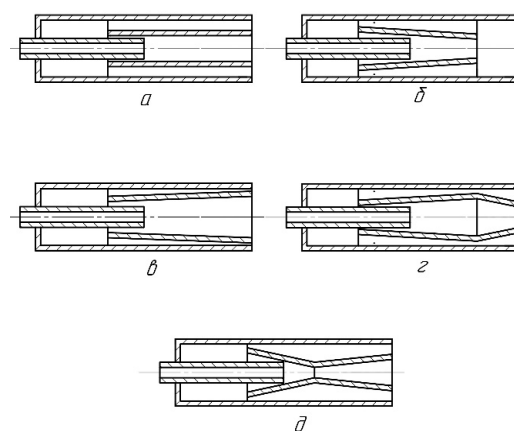


Рисунок 6 ИКС с экранами в рабочей камере

Завихрители в ИКС. В различных технических устройствах широко используются свойства закрученных течений, выражающиеся в их способности интенсифицировать процессы тепло- и массообмена, выравнивать локальные температурные неоднородности за счет конвективного перемешивания, подавлять или усиливать случайные возмущения, стабилизировать процессы течения в условиях сложного теплообмена при протекании химических реакций или процессов горения и др. [13]. В ИКС могут быть использованы многие известные виды завихрителей: скрученная лента с постоянным шагом закрутки, пластинчатая спиральная вставка, проволочная навивка, винтовое оребрение, трубы с однозаходной и многозаходной спиральной накаткой, винтовая вставка из скрученной ленты с переменным шагом, шнек, каналы с развитыми поверхностями в виде периодического спирального оребрения или накатки, завихрители в виде шнековых вставок с постоянным и переменным диаметром центрального тела, тангенциальные завихрители с одним и двумя подводными каналами, аксиально-лопаточные завихрители с профилированными и плоскими лопатками. Известно много работ по использованию подобных завихрителей для облегчения условий перехода горения в детонацию.

Завихрители широко используются в газовых смесителях для повышения качества смешения газов. Сюда же можно отнести касательный ввод газов-компонентов горючей смеси при раздельной подаче в ИКС.

В доступных нам работах нет исследований, посвященных закручиванию импульсных потоков газовой детонации с взвешенными частицами порошка. Проведение таких исследований и разработок представляется перспективным. Тем более известен успешный опыт закрутки высокоскоростных напылительных потоков при газодинамическом холодном напылении (ХГН) [14, 15]. В этих трудах показана возможность управления концентрацией частиц по сечению струи в условиях ХГН путем закрутки потока либо

организации в струе продольных вихрей, предложен способ газодинамического конструирования формы пятна напыления при ХГН. Аналогичные работы следует проводить и при детонационно-газовом напылении. В этих же публикациях изучено применение сопел с проницаемым профилем и сквозными щелями на сверхзвуковом участке для управления формой пятна напыления. Возможность напыления покрытий с перфорированными стенками выходного ствола была показана нами ранее [8].

Пространственное положение ИКС. По пространственному расположению различают ДГУ с горизонтальным, вертикальным и наклонным расположением. При использовании стволов сложной формы (с непрямолинейной камерой сгорания) этот признак следует относить к выходному участку ствола, который используется непосредственно для нагрева и ускорения порошка потоком продуктов сгорания и должен быть прямолинейным. Пространственное положение ствола влияет на компоновку ДГУ и процессы наполнения свежей горючей смесью и особенно порошком. В вертикальном положении улучшаются условия газообмена при наполнении ствола, исключается гравитационное осаждение порошка на вертикальные стенки, а явление гравитационного осаждения может полезно использоваться при наполнении ствола.

ДГУ может быть выполнена с регулируемым наклоном ствола для более удобной настройки системы «ДГУ — приспособление — деталь». Изменение пространственного положения ствола используется также для перехода от режимов настройки и выхода ДГУ на стабильный режим работы к рабочему (установившемуся) режиму работы.

Выводы:

1. Импульсные камеры сгорания (ИКС или стволы) детонационно-газовых установок для напыления покрытий (ДГУ) являются основным компонентом, поскольку их геометрия и размеры являются опреде-

ляющими при проектировании операционных технологических процессов детонационно-газового напыления покрытий. В совокупности со свойствами детонирующей смеси газов эти параметры являются одними из основных в стабильном обеспечении требуемого состояния напыляемых частиц порошка во время формирования единичных пятен покрытия. Конструктивные параметры в основном определяют форму и размеры единичных пятен покрытия, производительность напыления, габариты ДГУ и др.

2. Наиболее технологичными являются прямые ИКС с постоянным по длине поперечным сечением. Их технологические возможности могут быть расширены за счет использования дополнительных конструктивных элементов: вставок, экранов,

завихрителей и других устанавливаемых в рабочей полости камеры сгорания устройств для облегчения перехода горения в детонацию.

3. Техничко-экономические характеристики ДГУ могут быть улучшены за счет совершенствования ИКС, в том числе следует обобщить опыт создания и применения ИКС с переменным поперечным сечением, с поворотами, с завихрителями и др. Требуют дальнейших исследований и разработки системы, обеспечивающие работу ИКС: газообмена, подготовки горючей смеси, подачи порошка с контролируемым расходом и др.

4. Необходимо разработать инженерные методы расчета основных параметров ИКС и практические рекомендации по их конструированию.

Библиографический список

1. Применение детонации в газах для нанесения покрытий [Текст] / Ю. А. Харламов, М. Х. Шоршоров, В. В. Кудинов, О. В. Гусев, Б. Л. Рябошапка // *Физика горения и взрыва*. — 1975. — Т. 11, № 1. — С. 88–95.
2. Kharlamov, Y. A. Gaseous pulse detonation spraying: current status, challenges, and future perspective [Text] / Y. A. Kharlamov // *Intern. Thermal Spray Conference & Exposition ITSC : conference proceedings (Maastricht, The Netherlands, June 2–4, 2008)*. — DVS — German Welding Society, 2008. — P. 159–166.
3. Харламов, Ю. А. Детонационно-газовые установки для нанесения покрытий (обзор) [Текст] / Ю. А. Харламов // *Сварочное производство*. — 1989. — № 11. — С. 21–24.
4. Kharlamov, Y. Design concepts of gaseous detonation guns for thermal spraying [Text] / Y. Kharlamov, M. Kharlamov // *Teka Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa*. — 2013. — Vol. 13, № 4. — P. 82–91.
5. Pulse detonation propulsion: challenges, current status, and future perspective [Text] / G. D. Roy, S. M. Frolov, A. A. Borisov, D. W. Netzer // *Progress in Energy and Combustion Science*. — 2004. — Vol. 30; № 6. — P. 545–672.
6. Батраев, И. С. Использование многокомпонентного топлива метилацетилен-алленовая фракция (МДФ) при детонационном напылении [Текст] / И. С. Батраев // *Упрочняющие технологии и покрытия*. — 2017. — Т. 13, № 1. — С. 14–19.
7. Переход горения в детонацию в канале с диаметром меньше критического диаметра существования стационарной детонации [Текст] / Д. И. Бакланов, В. В. Голуб, К. В. Иванов, М. С. Кривокорытов // *Теплофизика высоких температур*. — 2011. — Т. 49, № 6. — С. 1–6.
8. Шоршоров, М. Х. Физико-химические основы детонационно-газового напыления покрытий [Текст] / М. Х. Шоршоров, Ю. А. Харламов. — М. : Наука, 1978. — 224 с.
9. Рыбанин, С. С. К теории детонации в шероховатых трубах [Текст] / С. С. Рыбанин // *ФГВ*. — 1969. — № 3. — С. 395–403.
10. Солодовников, А. В. Исследование пульсирующих камер сгорания и их применение в аэрокосмической технике [Текст] / А. В. Солодовников, Е. Н. Вышегородцев, В. В. Голубятник // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета*. — 2009. — № 3 (19). — С. 335–343.

11. Злобин, С. Б. Детонационное напыление и исследование свойств покрытий из сплавов на никелевой основе и чугуна [Текст] / С. Б. Злобин, В. Ю. Ульяницкий, А. А. Штерцер // Упрочняющие технологии и покрытия. — 2008. — № 11. — С. 36–41.

12. Фролов, С. М. Иницирование газовой детонации в трубе с профилированным препятствием [Текст] / С. М. Фролов, В. С. Аксенов // Доклады Академии наук. — 2009. — Т. 427, № 3. — С. 344–347.

13. Митрофанова, О. В. Гидродинамика и теплообмен закрученных потоков в каналах с завихрителями (аналитический обзор) [Текст] / О. В. Митрофанова // ТВТ. — 2003. — Т. 41, № 4. — С. 587–633.

14. Управление формой пятна напыления при ХГН. Ч. 1. Газодинамические аспекты [Текст] / В. Н. Зайковский, С. В. Клинков, В. Ф. Косарев, Б. М. Меламед, Г. В. Трубочеев // Теплофизика и аэромеханика. — 2014. — Т. 21, № 1. — С. 107–114.

15. Управление формой пятна напыления при ХГН. Ч. 2. Процесс напыления [Текст] / В. Н. Зайковский, С. В. Клинков, В. Ф. Косарев, Б. М. Меламед, Г. В. Трубочеев // Теплофизика и аэромеханика. — 2014. — Т. 21, № 2. — С. 233–240.

© Харламов Ю. А.

© Вишневецкий Д. А.

© Петров П. А.

© Орлов А. А.

*Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. МОЗЧМ ДонНТУ Еронько С. П.,
к.э.н., доц., зав. каф. ТОМП ДонГТИ Зинченко А. М.*

Статья поступила в редакцию 13.03.2023.

**Doctor of Technical Sciences Kharlamov Yu. A., Doctor of Technical Sciences Vishnevskiy D. A.,
PhD in Engineering Petrov P. A., Orlov A. A. (DonSTI, Alchevsk, LPR)**

PULSED COMBUSTION CHAMBERS FOR COATING SPRAYING

The article is devoted to the systematization and comparative analysis of structures and elements of pulsed combustion chambers (PCC) used in installations for detonation-gas spraying of coatings in order to further develop recommendations for their design. Four main stages of the working cycle of detonation-gas spraying of coatings are described. The basic requirements for pulsed combustion chambers are formulated. A classification of pulsed detonation combustion chambers is proposed. The design features of straight combustion chambers with a constant cross-section are considered in detail. The basic requirements for pulsed combustion chambers for the proper provision of the technology of detonation-gas spraying of coatings are formulated. The role of microgeometry of the internal surfaces of the PCC is described. Materials PCC. The variants of the closed (input) and open (output) parts of the PCC are considered. It is shown that the working cycle of detonation-gas spraying of coatings can be controlled by the use of additional structural elements in the working space of the PCC and swirlers. The role of the spatial position of the PCC in detonation-gas installations is considered.

Key words: *gas-thermal spraying, gas-thermal coatings, combustible gases, detonation-gas spraying, pulsed combustion chamber, powders, detonation products, pre-detonation distance.*